





Diplomarbeit

Entwicklung und Evaluierung eines Messplatzes zur Charakterisierung mikrofluidischer Strukturen auf einer rotierenden Scheibe

Christian Beer

Eingereichte Diplomarbeit gemäß den Bestimmungen der Prüfungsordnung der Universität Freiburg für den Diplomstudiengang Mikrosystemtechnik vom 5.05.1999.

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
IMTEK - Institut für Mikrosystemtechnik
Lehrstuhl für Anwendungsentwicklung
Georges-Köhler-Allee 103
D-79110 Freiburg im Breisgau

Autor Christian Beer
Maiergasse 6
D-79674 Todtnau-Muggenbrunn
eMail: cb@christian-beer.net
Matr.-Nr.: 931 59 53

Bearbeitungszeit 3. Januar 2003 bis 3. Juli 2003

Gutachter Prof. Dr. Roland Zengerle, Lehrstuhl für Anwendungsentwicklung
Prof. Dr. Hermann Sandmaier,
HSG-IMIT, Wilhelm-Schickard-Str. 10, 78052 Villingen

Betreuer Markus Grumann, Lehrstuhl für Anwendungsentwicklung.
Dr. rer. nat. Jens Ducrée, Lehrstuhl für Anwendungsentwicklung

Titelseite Die Abbildung zeigt den entwickelten Messplatz, mit dem sich Mikrofluidikstrukturen auf schnell rotierenden CDs beobachten lassen. Links im Sicherheitskasten ist der CD-Player, sowie die darüber befindliche CCD-Kamera mit Mikroskop zu sehen, welches auf einem Linearantrieb montiert ist. Rechts im Bild befinden sich die PCs zur Steuerung und Bildverarbeitung, sowie der Controller für den Linearantrieb.

Erklärung nach §9 (5) der Diplomprüfungsordnung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Christian Beer, Freiburg, den 3. Juli 2003

Für Carsten

Abstract

This diploma thesis includes the development of an experimental setup which makes it possible to characterise microfluidic processes on a rotating disc in the CD-format. High resolution images of structures on the micrometer scale can be recorded from the CDs that rotate with frequencies of up to 10.000 rpm.

This has been achieved by devising and realising an adequate concept of the experimental setup. A particular CD motive power drives the structured CDs with a high frequency stability. The number of revolutions of the player is governed by a PC and the current rotation frequency is given out as a TTL-compatible trigger signal. The CCD-camera „PCO SensiCam FastShutter SVGA“ whose exposure time goes down to 100 ns can be used for the image pickup. Furthermore the experimental setup consists of a stroboscope (DRELLO 255-01) for sufficient light intensity and a linear drive to position the microscope and the attached camera precisely along the radial direction of the CD:

For the detection of the rotation frequency as well as for the trigger signal for the stroboscope and the camera a special real-time-card (ADwin-light-16) is used which has got its own processor and can therefore perform its tasks in real time without depending on the PC. This card had to be programmed in a programming language that is close to Basic. A software panel in TestPoint has been developed for the steering of the whole system.

The linear drive and a controllable temporal delay of the camera exposure as against the motive power makes it possible to observe the complete surface of the CD during the rotation.

The present thesis shows the underlying concept of the experimental setup as well as the evaluation of the single components according to certain parameters. Great importance has be attached to the behaviour of the single components that is decisive for the experimental setup as a whole system.

It is only after a certain time that the stroboscope used in the experimental setup reaches the maximal light intensity. This delay of the flash had to be determined first at it is necessary to steer the camera this amount of time earlier composed to the stroboscope. Without the compensation that has been carried out this constant delay would lead to the fact that the structure that is to observe would move out of the image when the frequency changes. The occurring azimuthal picture shift has been analysed and assessed as well.

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde ein Messplatz entwickelt, der die Charakterisierung mikrofluidischer Prozesse auf einer rotierenden Scheibe im CD-Format ermöglicht. Von den mit bis zu 10.000 U/min rotierenden CDs können hochaufgelöste Bilder von Strukturen im Mikrometer-Maßstab aufgenommen werden.

Dies wurde durch ein entsprechendes Konzept des Messplatzes und dessen Umsetzung realisiert. Die strukturierten CDs werden durch einen speziellen CD-Antrieb mit hoher Frequenzstabilität angetrieben. Die Drehzahl des Players wird durch einen PC geregelt und die aktuelle Drehfrequenz wird als TTL-kompatibles Rechteck-Signal ausgegeben. Für die Bildaufnahme steht die CCD-Kamera „PCO SensiCam FastShutter SVGA" mit einer Belichtungszeit bis herab zu 100 ns zur Verfügung. Weiter besteht der Messplatz aus einem Stroboskop (DRELLO 255-01) für ausreichende Lichtintensität, sowie einem Linearantrieb, der das Mikroskop zusammen mit der adaptierten Kamera in radialer Richtung über der CD verfahren kann.

Für die Detektion der Drehfrequenz, sowie für die Ansteuerung von Stroboskop und Kamera, wird eine spezielle Messdatenerfassungskarte (ADwin-light-16) eingesetzt, die über einen eigenen Prozessor verfügt und damit ihre Aufgaben unabhängig vom PC in Echtzeit durchführen kann. Die Karte musste mit einer Basic-nahen Programmiersprache programmiert werden. Für die Ansteuerung des Gesamtsystems wurde eine Softwareoberfläche in TestPoint entwickelt.

Durch den Linearantrieb und eine steuerbare, zeitliche Verzögerung der Kamera-Belichtung gegenüber dem Antrieb ist es möglich, die gesamte Oberfläche der CD während der Rotation zu beobachten.

Die vorliegende Arbeit stellt das zugrundeliegende Konzept des Messplatzes, sowie die Evaluierung der Einzelkomponenten nach bestimmten Parametern dar. Dabei wurde jeweils besonderen Wert auf das für den Messplatz als Gesamtsystem entscheidende Verhalten der Einzelkomponente gelegt.

Das verwendete Stroboskop erreicht die maximale Lichtintensität erst nach einer gewissen Zeit. Diese Blitzverzögerung musste zuerst ermittelt werden, da die Kamera gegenüber dem Stroboskop um diese Zeit versetzt angesteuert werden muss. Dieser ständig vorhandene Zeitversatz würde ohne die durchgeführte Kompensation dazu führen, dass sich die zu beobachtende Struktur bei Änderung der Drehfrequenz aus dem Bild bewegt. Auch das aufgetretene azimutale Bildspringen wurde ausführlich untersucht und bewertet.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung dieser Arbeit

Diese Diplomarbeit ist innerhalb des Projektes „Bio-Disk“ der Produktgruppe Lab-on-a-Chip am Lehrstuhl für Anwendungsentwicklung (Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, IMTEK - Institut für Mikrosystemtechnik) angefertigt worden. Für das Projekt, welches in Kapitel 1.2 näher beschrieben wird, ist ein Messplatz erforderlich, der es ermöglicht, mikrofluidische Strukturen auf einer rotierenden Scheibe zu beobachten.

Die Kenntnis über das Verhalten von zentrifugal angetriebenen Flüssigkeiten spielt dabei eine zentrale Rolle. Im wesentlichen handelt es sich hier um Strömungsvorgänge und Mischprozesse von Fluiden im Mikroliterbereich. Die Strömung solcher Mikrofluide wird durch Parameter wie Kapillardruck, Zentrifugaldruck, Geometrie und Oberflächeneigenschaften der Kanäle bestimmt. Diffusions- bzw. Mischvorgänge werden durch die gleichen Parameter determiniert, wobei die Geometrie der Mischstrukturen von vergleichsweise großer Bedeutung ist.

Anhand des Messplatzes sollen zunächst Simulationsergebnisse einer vorangegangen Diplomarbeit am Lehrstuhl [1], die sich hauptsächlich mit Mischerstrukturen auf rotierenden Systemen beschäftigt hat, verifiziert werden. Parallel zu der hier vorgestellten Arbeit wurden in zwei weiteren Diplomarbeiten zusätzliche Mischer- und Schalter-Strukturen durch Simulation untersucht [2], sowie hydrophobe Beschichtungen charakterisiert [3]. In beiden Arbeiten, v.a. bei der Untersuchung hydrophober Ventile, in der Durchbruchsfrequenzen bestimmter Ventile ausfindig gemacht wurden, konnte der Messplatz bereits erfolgreich eingesetzt werden,

Ziel dieser Arbeit ist es, einen entsprechenden Messplatz zu konzipieren, aufzubauen und zu evaluieren. Hervorzuheben ist hierbei, daß trotz der hohen Umdrehungsgeschwindigkeiten der Scheibe (bis zu 10.000 U/min) ein hochauflösendes und zeitstabiles Bild mit einer lateralen Auflösung im µm-Bereich aufgenommen werden soll.

1.2 Das Bio-Disk-Konzept

Im Rahmen des Projektes „Bio-Disk“ soll ein neuartiges Blut-Analyse-System entwickelt werden. Als Plattform wurde eine Scheibe gewählt, deren Format der etablierten Compact-Disk (CD) nahe kommt. Dabei wird der Zentrifugaldruck - bedingt durch die Rotation der CD - als einziges aktives Steuerelement genutzt. Das Bio-Disk-Konzept kommt dabei ganz ohne weitere aktive Komponenten wie Pumpen oder Ventile im eigentlichen Sinn aus. Funktionen wie Medientransport, Trennen oder MIschen von Reagenzien werden allein durch die Zentrifugalkraft herbeigeführt.



Abbildung 1.1: Erster Prototyp einer Bio-Disk

Auf der CD sind Reservoire für Reagenzien, Kanäle und Reaktionskammern untergebracht. Ausgehend von der Probenaufbereitung des Vollbluts, welches im Zentrum der CD in ein dafür vorgesehenes Reservoir injiziert wird, bis hin zum Nachweis verschiedener Krankheitserregger (z.B. Hepatitis, Tetanus, Diphtherie, ...) wird eine vollständig auf der CD integrierte Prozessführung ermöglicht.

In Reaktionskammern am Rand der CD befinden sich Kügelchen, sogenannte Beads, auf denen verschiedene Antigene immobilisiert sein können. Dringt das Blut nun in die Reaktionskammern ein, so werden die Beads allseitig mit Blut umspült. Da das Blut sich in unmittelbarem Kontakt mit den Beads befindet, laufen die stattfindenden Antikörper-Antigen-Reaktionen aufgrund kürzerer Diffusionswege schneller ab. Versieht man die unterschiedlich beschichteten Beads zusätzlich mit Markierfarbstoffen, lassen sich die verschiedenen Reaktionen optisch nachweisen.

Ein klarer Vorteil dieser Technologie im Vergleich zu herkömmlichen Systemen ist, dass mit sehr geringen Volumina gearbeitet wird, was bei teuren Reagenzien erheblich zur Kostenersparnis beiträgt. Auch bei der Herstellung der CDs kann auf Standard- und damit günstige Prozesse zurückgegriffen werden, So wäre auch der routinemäßige Check eines Patienten auf bestimmte Risikofaktoren denkbar, ohne daß ein Verdacht vorliegt.

Das kompakte Format einer CD einschliesslich Player, der einem herkömmlichen Gerät sehr nahe kommen soll, ermöglicht auch den Einsatz als mobiles Gerät. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß es sich bei dem vorgestellten Player dieser Diplomarbeit nur um einen Messplatz handelt, der nichts mit dem endgültigen System zu tun hat. Er dient lediglich der Erforschung der genannten und weiterer Prozesse.

Zu diesem Zweck kommen derzeit verschiedene Arten von CDs als Bio-Disks zum Einsatz. Einerseits werden Trockenresist-beschichtete Standard-CDs verwendet, bei denen die funktionalen Strukturen photolithographisch in die Resist-Schicht eingebracht werden. Andererseits kommen in PMMA-Platten gefräste Strukturen auf einem Alu-Träger im CD-Format zur Anwendung.

2 Konzept des Messplatzes

2.1 Überblick

Grundlage des Detektionskonzeptes des Messplatzes ist der Stroboskop-Effekt. Stroboskope werden zur Visualisierung von Objekten eingesetzt, die sich schneller bewegen, als das menschliche Auge dies wahrnehmen kann. Das Objekt wird hier synchron, also mit derselben oder einem ganzzahligen Bruchteil der Objektfrequenz, mit einer Gasentladungslampe beblitzt, wodurch der Eindruck eines stehenden Bildes entsteht [4], [5], [6].

Da es sich bei dem Messplatz um die Beobachtung eines periodischen Voganges (rotierende Scheibe) handelt, wird im folgenden nicht näher auf aperiodische Vorgänge eingegangen, deren Beobachtung mit Stroboskopen natürlich auch möglich ist

Wird nun die Bildaufnahmefrequenz im Vergleich zur Objektfrequenz variiert, so erhält man eine Art Zeitlupenaufnahme des schnell ablaufenden Vorganges, da die einzelnen Bilder jedesmal einen anderen Zeitpunkt innerhalb der Periodendauer des Objektes repräsentieren.

Im vorliegenden Fall soll ein Standbild eines bestimmten Bildausschnittes auf einer rotierenden Scheibe erzielt werden. Hierfür ist es erforderlich, die Bildaufnahmefrequenz der Objektfrequenz anzupassen. Hinzu kommt, daß die Position des Bildausschnittes auf der CD während der Rotation auch variiert werden soll, was einer zusätzlichem Ansteuerung bedarf.

Bisher wurde am Lehrstuhl für Anwendungsentwicklung die Stroboskop-Kamera MOCON/RT der Firma VISIT GmbH & Co.KG eingesetzt. Diese Kamera kommt ohne zusätzliches Stroboskop aus. Hier wird lediglich der elektronische Verschluß (Shutter) der Videokamera für kurze Zeit (bis herab zu 1,25 µs) geöffnet. Dies ist gleichbedeutend mit einem extern zugeführten Stroboskop-Blitz, da es nur darauf ankommt, das zu beobachtende Objekt für einen sehr kurzen Zeitraum sichtbar zu machen.

Aufgrund der geforderten hohen Drehzahlen der CD und der geringen Dimensionen der zu beobachtenden Strukturen, bzw. der geforderten hohen Auflösung ist eine Belichtungszeit von 1,25 µs für diese Anwendung nicht klein genug. Da sich die zu beobachtenden Strukturen während der Belichtungszeit weiterbewegen, wären die aufgenommenen Photos

verschmiert. Deshalb wurde eine andere Kamera mit einer Belichtungszeit bis herab zu 100 ns eingesetzt. Dies wird in Kapitel 3.3 ausführlicher erläutert.

Bereits bei Belichtungszeiten von 1,25 µs muß zusätzlich mit einer Kaltlichtquelle beleuchtet werden, um ein ausreichend helles Bild zu erhalten. Die Belichtungszeit, also die Zeit in der das Licht auf den CCD-Chip trifft, liegt nun um einen Faktor zehn darunter. Dies macht die Verwendung einer Lichtquelle mit hoher Intensität erforderlich, um in dieser kurzen Zeit genügend Lichtenergie auf den CCD-Chip zu bringen. Solch große Intensitäten werden am einfachsten mit Gasentladungslampen erreicht.

Alternativ kann man die Belichtungszeit der Kamera auch größer wählen, wenn man das Objekt entsprechend kurz beblitzt. Man erhält dadurch dennoch eine Aufnahme eines kurzen Momentes, welcher der Dauer des Blitzes entspricht. Hätte man also ein Lichtblitzgerät mit kurzen Pulsen und ausreichender Intensität zur Verfügung, so könnte man auch eine kostengünstigere Kamera einsetzen.

Aus diesem Grund wurde auch nach alternativen Blitzgeräten recherchiert. Dabei wurde an die Verwendung von Laserdioden gedacht. Laserdioden liefen aber kein kontinuierliches Licht-Spektrum, sondern senden nur diskrete Wellenlängen aus. Der Einsatz von bestimmten Wellenlängen ist durchaus auch denkbar, aber die Verwendung des gesamten Spektrums des sichtbaren Bereichs stellt derzeit den größten Handlungsspielraum zur Verfügung. Ein weiterer Punkt, warum Laserdioden nicht zum Einsatz kamen, ist die deutlich geringere Intensität der Laserdioden im Vergleich zum verwendeten Stroboskop.

Die Abbildung 2.1 stellt schematisch den Aufbau des gesamten Messplatzes dar. Das Kernstück bildet der Antrieb der Bio-Disk, der sogenannte Bio-Disk-Player, oder kurz CD-Player. Er wird durch den Steuerungs-PC über eine RS232-Schnittstelle angesteuert. Die Drehzahl der CD kann bis zu einer Umdrehungsrate von 10.000 U/min kontrolliert eingestellt werden. Das Gerät ist zudem mit einem BNC-Ausgang versehen, der den Nulldurchgang über ein TTL-kompatibles Rechteck-Signal ausgibt. Pro Umdrehung der CD wird ein Puls ausgegeben, mit dem sich die Periodendauer bzw. Frequenz der CD ermitteln läßt.

Die Signalaufnahme und Berechnung der Frequenz erfolgt mit einer speziellen Real-Time- Messkarte (ADwin-light-16). Diese Karte übernimmt zudem die Steuerung des Stroboskops (DRELLO 255-01) und der Frame-Grabber-Karte der Digitalkamera PCO SensiCam FastShutter SVGA. Die hochauflösende CCD-Kamera mit einer Belichtungszeit von 100 ns ist auf einem Mikroskop adaptiert, welches mit einem Linearantrieb verfahren werden kann. Der Linearantrieb wird ebenfalls durch den Steuerungs-PC angesteuert und ermöglicht es, die Kamera in radialer Richtung über den gesamten Radius der CD von r = 6 cm hin- und her zu bewegen, um verschieden Bildausschnitte betrachten zu können. Das Mikroskop dient außer der Vergrößerung auch der Fokussierung. Für die Bildverarbeitung steht ein weiterer PC zur Verfügung.

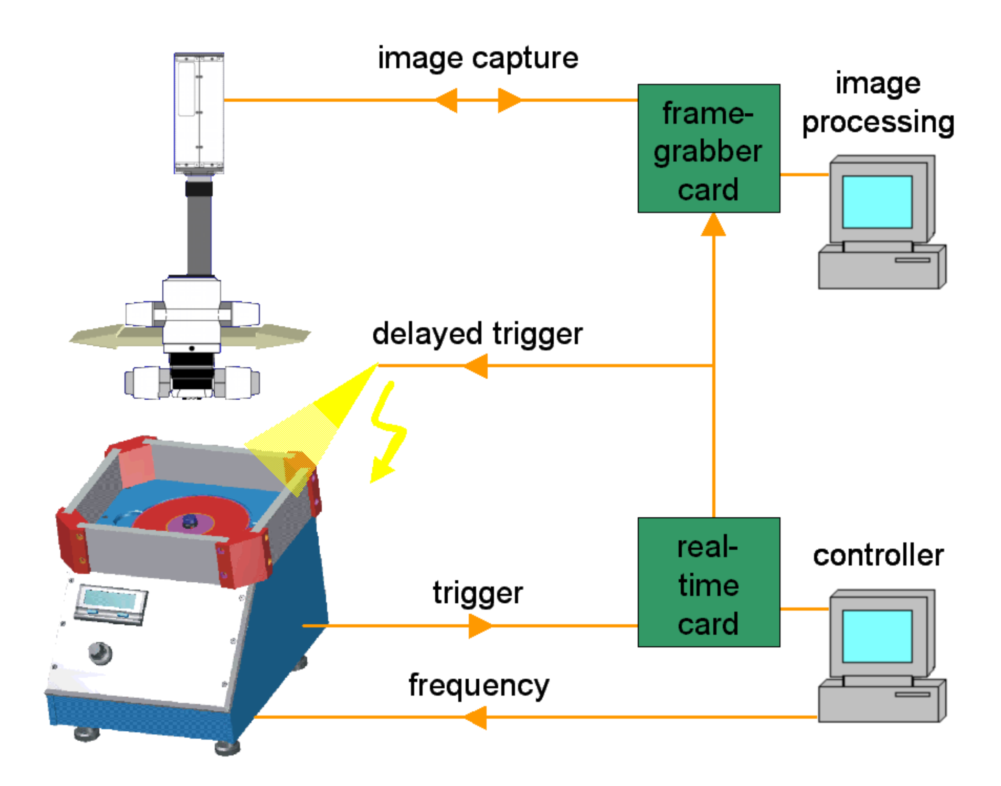


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau des Messplatzes zur Beobachtung mikrofluidischer Vorgänge auf der Bio-Disk

2.2 Ansteuerung der Komponenten

In diesem Kapitel werden die Zusammenhänge zwischen den Signalen zur Ansteuerung der Einzelkomponenten genauer vorgestellt, um das Ziel - die Entwicklung des Messplatzes als Gesamtsystem - nicht aus den Augen zu verlieren. Dabei werden die in Kapitel 3 erzielten Resultate bereits angesprochen, aber nicht näher darauf eingegangen.

Abbildung 2.2 zeigt den Signalfluß, ausgehend vom Steuerungs-PC. Mit diesem wird dem CD-Player eine bestimmte Drehfrequenz υ_0 vorgeben. Der CD-Player dreht nun mit einer Frequenz υ_1, die durchaus von υ_0 abweichen kann, da einerseits der vorgegebene Wert generell nicht exakt erreicht wird, und andererseits der Player eine gewisse, jedoch sehr geringe Schwankung in der Frequenzstabilität aufweist (siehe. Kap. 3.2). Für die Ansteuerung von Stroboskop und CCD-Kamera muß daher der Wert der tatsächlichen Drehfrequenz υ_1 verwendet werden.

Dieses Signal wird durch die ADwin aufgenommen und abhängig von verschiedenen Benutzereingaben (für unterschiedliche Beobachtungswinkel auf der CD) durch den Steue-

rungs-PC in ein Triggersignal der Frequenz υ_2 für das Stroboskop und die CCD-Kamera umgesetzt. Die ADwin-Karte muss dabei auch eine Teilung der Playerfrequenz vornehmen, da die CCD-Kamera bei voller Auflösung mit maximal 8 Hz betrieben werden darf.

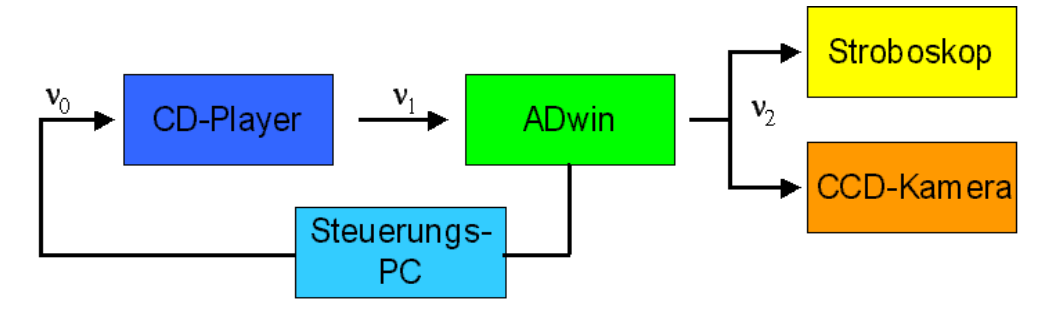


Abbildung 2.2: Flussdiagramm der Steuersignalabfolge ausgehend vom Steuerungs-PC. Die CCD-Kamera wird in der Regel mit einer Verzögerung von 12,8 µs gegenüber dem Stroboskop ausgelöst.

In Kapitel 2.1 wurde die Notwendigkeit der Nutzung eines Stroboskops bereits dargelegt. Der Intensitäts-Zeitverlauf von Gasentladungslampen hängt stark von der verwendeten Blitzröhre ab und kann von Röhre zu Röhre sehr unterschiedlich sein. Ausführlichere Informationen hierzu sind in Kap. 3.1 zu finden. An dieser Stelle soll die Aussage genügen, daß das verwendete Stroboskop die maximale Lichtintensität erst nach einer Zeit von 12,8 µs nach der aufsteigenden Flanke des Steuersignals erreicht. Dies führt dazu, dass das Stroboskop um diese Zeit vor dem Öffnen des Shutters der CCD-Kamera angesteuert werden muss, um in dem Moment der Bildaufnahme die maximale Lichtintensität mit der geringsten Schwankung zur Verfügung stellen zu können (siehe Kap. 3.1).

Die Real-Time Karte (ADwin-light-16, siehe Kap. 3.5) erfaßt die Flanke des Nulldurchgangstriggers des CD-Players und berechnet daraus die Drehfrequenz der CD. Für die Programmierung der ADwin-Karte ist es praktikabler, sich nicht die Frequenzen, sondern die Periodendauern des CD-Players anzusehen. Denn die Karte berechnet ausgehend von dem Nulldurchgangsimpuls die Wartezeit, nach der die Kamera das Bild aufnehmen soll. Dieser Sachverhalt ist in Bild 2.3 dargestellt.

Würde das Stroboskop und die Kamera einfach direkt durch das Nulldurchgangssignal angesteuert, so hätte man entweder ein dunkles Bild, oder man würde beim Verändern der Player-Frequenz nie den selben Bildausschnitt sehen. Das Bild wäre deshalb dunkel, weil die Belichtungszeit der Kamera bereits nach 100 ns beendet ist und das Stroboskop aber mindestens 5 µs lang kein Licht aussendet. In der Software für die CCD-Kamera kann eine gewisse Wartezeit (delay) eingestellt werden, welches die Kamera erst nach dieser Wartezeit auslöst. Man könnte also hier den Wert von 12,8 µs eintragen und würde ein ausreichen helles Bild erhalten.

Wird aber nun das Bild immer konstant 12,8 µs nach dem Nulldurchgangspuls aufgenommen, so führt dies bei sich verändernden Drehfrequenzen jedesmal zu einem anderen laateralen Bildausschnitt. Wenn s den zurückgelegten Weg eines bestimmten Punktes auf der CD während der Zeit t darstellt, so gilt hierfür folgende Formel:

$$s = v \cdot t = \omega \times r \cdot t = 2 \cdot \Pi \cdot \upsilon \times r \cdot t$$

Die Bahngeschwindigkeit v bei Radius r berechnet sich aus der Winkelgeschwindigkeit ω multipliziert mit dem Radius r, die Winkgelgeschwindigkeit wiederum durch $\omega = 2 \cdot \Pi \cdot \nu$ mit der Drehfrequenz ν des Players.

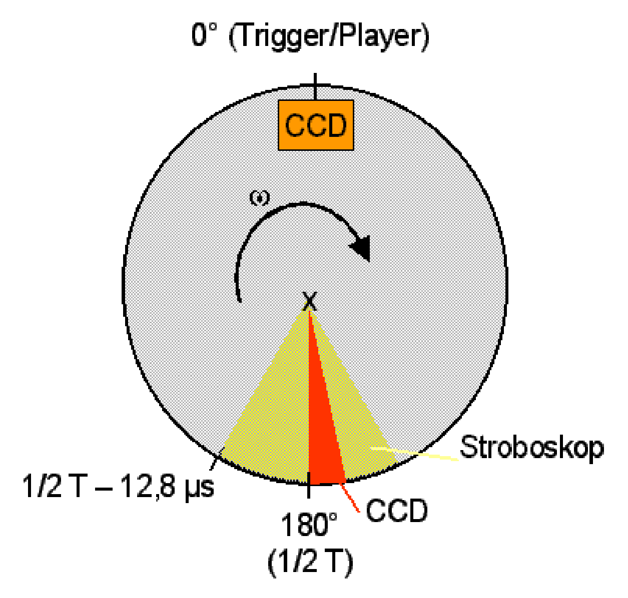


Abbildung 2.3: Der CD-Player gibt pro Umdrehung ein Triggersignal aus. Die Position der Nulldurchgangsmarke des Players gegenüber der Kamera ist willkürlich. Das gezeigte Beispiel stellt den Moment dar, in dem sich diese Nulldurchgangsmarke am oberen Bildrand befindet. Die CCD-Kamera ist stationär an der angedeuteten Stelle (oranger Kasten) montiert. Zu diesem Zeitpunkt befinde sich das Nulldurchgangssignal der CD also direkt senkrecht unter der Kamera.
In diesem Fall soll bei 180° bezüglich des Nulldurchgangs ein Bild aufgenommen werden. Somit muß die Kamera nach einer halben Periodendauer (1/2 T) nach dem Nulldurchgangssignal ausgelöst werden. Dreht sich die CD nun wie angedeutet rechts herum, so befindet sich zum Zeitpunkt t = 1/2 T - 12,8 µs die damit gekennzeichnete Markierung unter der Kamera.
In diesem Moment wird ein Triggersignal für das Stroboskop gesetzt. Das gelbe Segment stellt den dadurch belichteten Bereich während der Rotation auf der CD dar. 12,8 µs später, also bei 1/2 T und somit bei exakt 180° wird die Bildaufnahme ausgelöst, was durch den roten Bereich gekennzeichnet ist.

Wenn nun t (hier die Wartezeit bis zur Bildaufnahme) und r konstant gehalten werden, sich aber ν bzw. ω verändert, so ist der zurückgelegte Weg s direkt von dieser Frequenz ν abhängig, und damit nicht konstant, repräsentiert also nicht den selben Bildausschnitt.

Es muss also ein von der jeweiligen Periodendauer bzw. Frequenz abhängiger Bildaufnahmezeitpunkt vorausberechnet werden. Entscheidend ist also allein die Wartezeit zwischen Nulldurchgangstrigger und Startzeitpunkt der Kamera-Belichtung. Das Stroboskop muss lediglich begleitend dazu im richtigen Moment angesteuert werden, um während der Bildaufnahme genügend Licht zur Verfügung stellen zu können. Dies ist bezüglich des Startzeitpunktes der Kamera-Belichtung bei 12,8 µs vorher der Fall.

Um auch andere Orte auf der CD beobachten zu können, muß der Aufnahmezeitpunkt dementsprechend angepaßt werden. Bei einer Wartezeit von $t = 3/4\ T$ nach dem Nulldurchgangssignal würde man z.B. den Bildmittelpunkt auf 270° bzgl. des Nulldurchgangssignals setzen.

3 Komponenten des Messplatzes

In diesem Kapitel werden die einzelnen Komponenten des Messplatzes ausführlicher beschrieben. Dabei wird jeweils auf die Anforderungen der Einzelkomponente in Bezug auf das Gesamtsystem eingegangen. Anschließend folgt das Konzept, bzw. die Beschreibung der Integration in den Messplatz, sowie die Evaluation der Einzelkomponente.

Teilweise wird auch die Ansteuerung der Komponenten über die TestPoint-Oberfläche des Messplatzes erwähnt - für die vollständige Dokumentation der Softwareoberfläche sei an dieser Stelle auf Kapitel 4.1 verwiesen.

3.1 Stroboskop

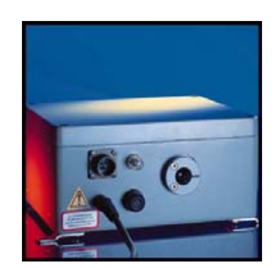


Abbildung 3.1: Lichtblitzstroboskop DRELLO 255-01

3.1.1 Anforderungen

Bei dieser Komponente beschränken sich die Anforderungen zunächst auf eine Gasentladungslampe mit ausreichender Lichtintensität, welche extern gesteuert werden kann. Wichtig für den Messplatz ist allerdings die genaue Kenntnis über das Verhalten der Blitzlampe. Hierauf wird im Kapitel 3.1.2 Evaluierung näher eingegangen. Verwendet wird das Gerät 255-01 der Firma DRELLO Ing. Paul Drewell GmbH & Co. KG.

Technische Daten DRELLO 255-01

- Blitzfrequenz 0...50 Hz
- Blitzenergie max. 2,5 Ws/Blitz
- Blitzdauer 5...8 µs (in halber Amplitudenhöhe = Halbwertszeit)
- Spektralbereich 300...1100 nm
- Triggerung + 3...+12 V; 0,03...1 ms Dauer

Das Gerät ist zudem mit einem 1 m langen Glasfaserlichtleiter mit einem aktiven Durchmesser von 13 mm ausgestattet. Nachfolgende Abb. 3.2 zeigt den typischen Intensitäts-Zeitverlauf des Lichtblitzstroboskopes DRELLO 255-01.

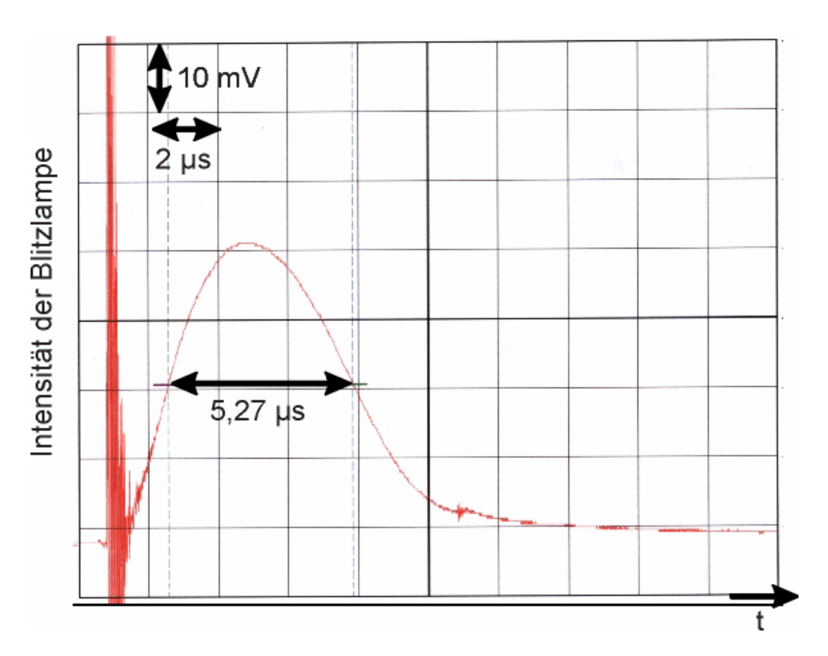


Abbildung 3.2: Typischer Intensitäts-Zeitverlauf des Lichtblitzstroboskopes DRELLO 255-01, Blitzdauer in halber Amplitudenhöhe = Halbwertszeit: 5,27 µs [Quelle: Fa. DRELLO]

3.1.2 Evaluierung der Reproduzierbarkeit

Zunächst wurde die Reproduzierbarkeit des Stroboskops in Bezug auf Intensität und Repetition untersucht. Es stellt sich die Frage, ob ein bestimmter Intensitätswert immer zu einem definierten Zeitpunkt auftritt. Dies muss natürlich gewährleistet sein, damit in dem Moment, in dem die Kamera das Bild aufnimmt, genügend Intensität zur Verfügung steht.

Als charakteristischer Intensitätswert wird hierfür der Maximalwert betrachtet. Außerdem ist in diesem Bereich die Ableitung der Intensität nach der Zeit gleich null, bzw. sehr gering, so dass während der Belichtungszeit der Kamera nur minimale Helligkeitsschwankungen auftreten. Würde man die Bilder zu einem anderen Zeitpunkt innerhalb des Intensitätsverlaufes des Blitzes aufnehmen, so hätte man bei jedem Schwanken der Periodendauer des Stroboskops unterschiedlich helle Bilder.

Die Reproduzierbarkeit der Repetitionsrate läßt sich nun auf zwei Arten darstellen. Einerseits kann man den jeweiligen zeitlichen Abstand zweier aufeinanderfolgender Pulse miteinander vergleichen. Man kann aber auch die Zeit, die die Blitzlampe zum Erreichen der maximalen Intensität benötigt, bezüglich der aufsteigenden Flanke des Steuersignals betrachten. Diese Zeitdifferenz oder Blitzverzögerungszeit ist in den Abbildungen 3.3 und 3.4 zu sehen. Die Charakteristik der Lichtblitzkurve, sowohl der Intensitäts-Zeitverlauf, als

auch die Blitzverzögerung hängt stark von der Gasentladungslampe ab und kann von Röhre zu Röhre unterschiedlich sein.

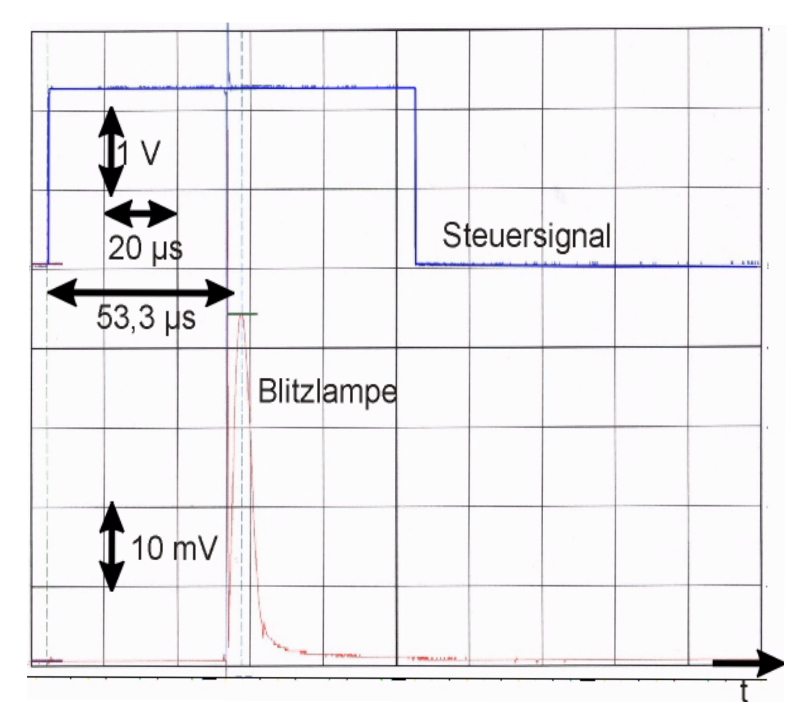


Abbildung 3.3: Blitzverzögerung: Zeitdifferenz zwischen Steuersignal (obere Kurve) und maximaler Intensität des Stroboskopes DRELLO 255-01 [Quelle: Fa. DRELLO]

Wenn die Blitzverzögerung konstant ist, so kann auch von einer reproduzierbaren Repetionsrate, bzw. Frequenz des Stroboskops gesprochen werden. Für die Integration des Stroboskops in den Messplatz ist es aber sinnvoller den Zeitabstand zwischen Triggersignal und Maximalwert der Intensität zu betrachten. Da sich die Drehzahl der CD von Blitz zu Blitz ändern kann, ist die Möglichkeit einer konstanten Blitzfrequenz nicht entscheidend. Viel wichtiger ist es, die Zeitdauer nach dem Steuersignal bis zur maximalen Intensität zu kennen, denn abhängig davon muss die Bildaufnahme der CCD-Kamera gestartet werden.

Die unterschiedlichen Zeitdifferenzen zwischen Abb. 3.3 und Abb. 3.4 werden durch den Hersteller folgendermaßen begründet: Wenn die Steuerspannung unterhalb von 4 V liegt, so hängt die Blitzverzögerungszeit stark von der Amplitude des Signals ab und kann bis zu 55 µs betragen. Im Rahmen der gesamten Arbeit wurde stets ein rechteckförmiges Steuersignal mit einer Amplitude von 5 V verwendet.

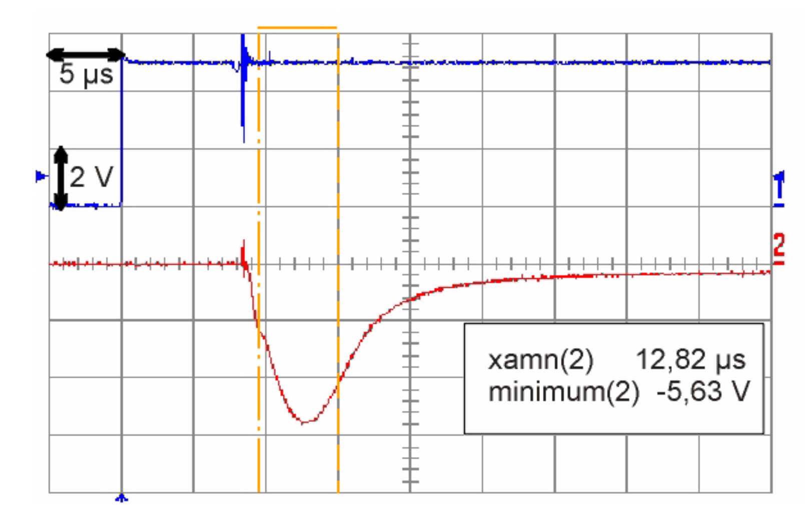


Abbildung 3.4: Blitzverzögerung: Zeitdifferenz zwischen Steuersignal (obere Kurve) und Intensitätsverlauf des Stroboskopes DRELLO 255-01 (eigene Messung)

Für die Charakterisierung der Blitzlampe nach den Parametern Zeitverhalten und Intensität wurde zunächst in Zusammenarbeit mit Herrn Jankov[1] eine Photodiodenverstärker-Schaltung entwickelt (vgl. Abb. 3.5).

Als Detektor wurde die Diode S7797 von Hamamatsu gewählt [7], die zum einen über den gesamten Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes eine ausreichende Sensitivität (vgl. Abb. 3.6) aufweist, und zudem über eine zeitliche Auflösung von 2 ns verfügt (Cut-off frequency: 500 MHz). Da die Belichtungszeit der Kamera auf 100 ns festgelegt werden soll, ist es unverzichtbar, den Kurvenverlauf des Stroboskops mit einer Auflösung von deutlich kleiner als 100 ns aufzunehmen.

Der Photodiodenverstärker setzt nun den Strom, der bei Belichtung der Photodiode generiert wird, in ein Spannungssignal um. Durch Lichtintensitätsmessungen kann diese Schaltung auch kalibriert werden, wodurch jedem Spannungswert eine bestimmte Lichtintensität zugeordnet werden kann. Hierauf wurde allerdings verzichtet, da die tatsächliche Intensität des Stroboskops für die Anwendung innerhalb des Messplatzes derzeit nicht von großer Bedeutung ist. Es interessiert lediglich die Frequenzstabilität (bzw. Stabilität der Blitzverzögerung) und die Stabilität der Intensität. Außerdem steht am Lehrstuhl ein solches Messgerät nicht zur Verfügung.

1. Elektrowerkstatt des IMTEK

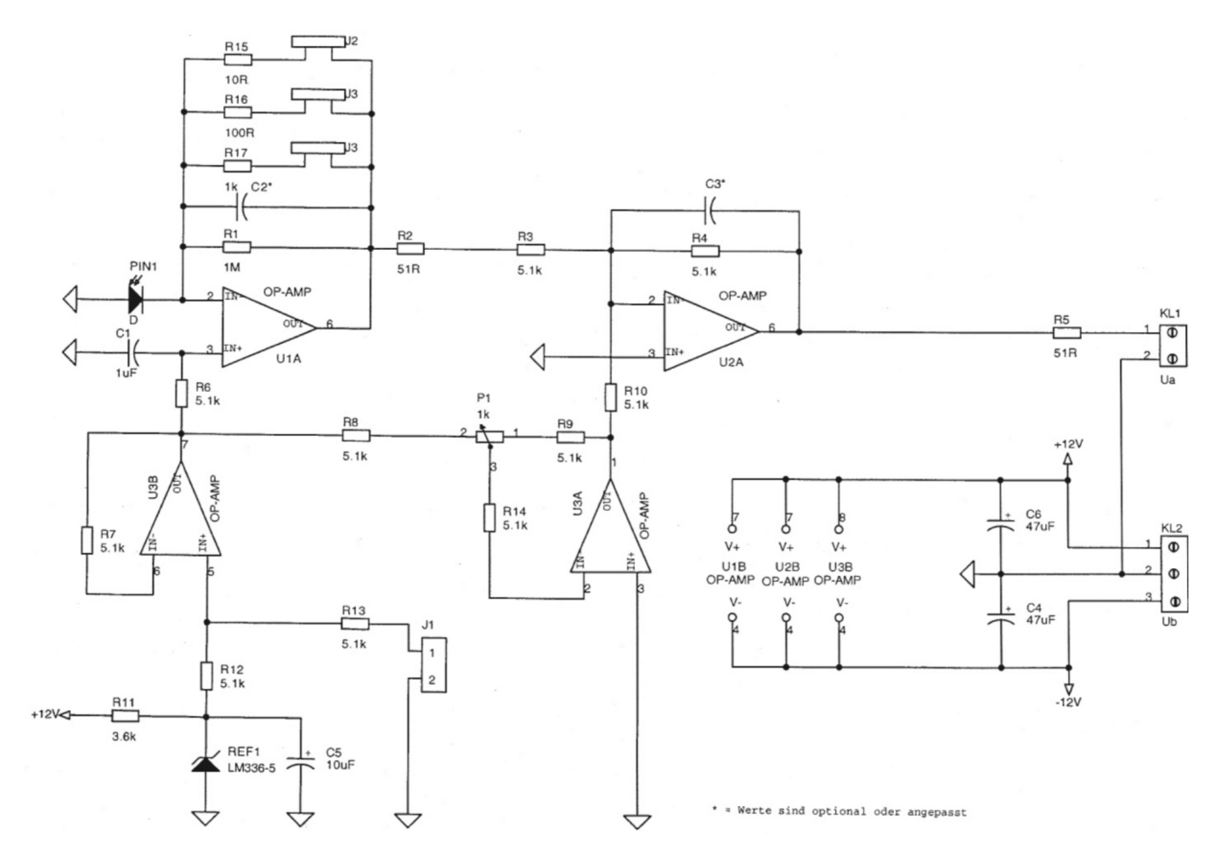


Abbildung 3.5: Schaltplan des Photodiodenverstärkers

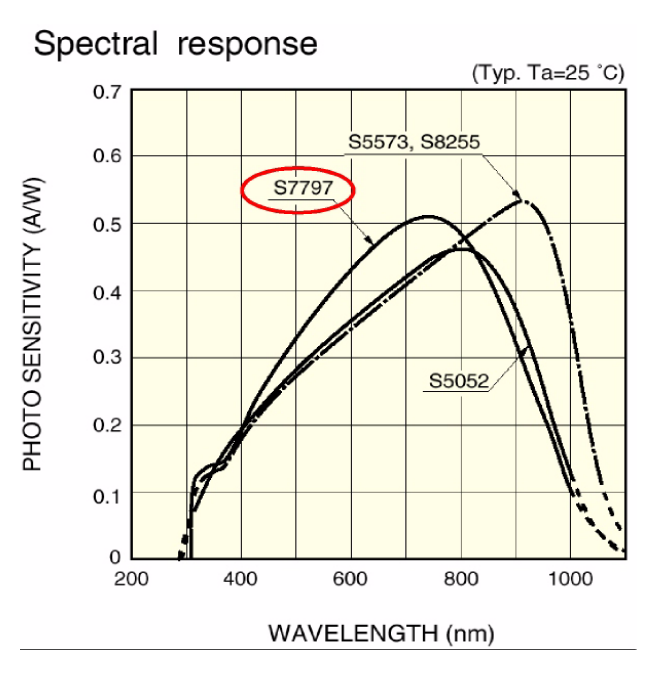


Abbildung 3.6: Spektralantwort der Photodiode Hamamatsu S7797

Regelung der Intensität des Stroboskops

Auf der Gerätevorderseite des Stroboskops befindet sich eine Potentiometerschraube, mit der die Intensität laut Hersteller stufenlos zwischen 30 und 100 % der maximalen Leistung eingestell werden kann. Durch eigene Messung mit dem Photodiodenverstärker wurde der in Abbildung 3.7 dargestellte Zusammenhang zwischen Lichtintensität und Potentiometerstellung ermittelt. Die Piktogramme symbolisieren dabei die reale Stellung der Potentiometerschraube am Gerät.

Einfluss des Adjust-Potentiometers

Betrag des Detektor-Peaks [V]

7,0
6,0
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
0,0

average [V]
high [V]
low]V]

0 30 60 90 120 150 180 210

Stellung der Adjust-Potentiometer-Schraube [°]

Abbildung 3.7: Einfluss des Adjust-Potentiometers auf die Intensität bei 1 Hz

Das Potentiometer bestimmt die maximale Aufladespannung der Kondensatoren, welche die Zündspannung der Spule generieren. Bei höheren Frequenzen nimmt die Intensität bei gleicher Potentiometerstellung ab, da die Kondensatoren während kürzerer Periodendauern nicht so stark aufgeladen werden können. Exemplarisch wurde diese Messung bei 1 Hz durchgeführt; bei höheren Frequenzen ist bis auf eine geringere Maximalintensität der gleiche Zusammenhang zu erwarten.

Die Ausrichtung des Stroboskops zur Diode wurde hier auf die gleiche Weise vorgenommen, wie bereits zuvor erwähnt. Lediglich der Abstand wurde auf 44 cm angepasst. Dieser wurde so gewählt, um auch bei maximaler Potentiometerstellung die Verstärkerschaltung nicht zu übersteuern.

Die Grafik 3.7 zeigt jeweils den Mittelwert, sowie den höchsten und tiefsten Messwert von ca. 100 Blitzereignissen - ermittelt über den Statistik-Modus des LeCroy-Oszilloskops. Die

Standardabweichung liegt im Bereich von 0,5 % vom Mittelwert, außer bei der kleinsten Einstellung, wo sie 10,73 % beträgt. Es empfiehlt sich also nicht, das Stroboskop mit der geringsten Potentiometerstellung zu betreiben.

Bemerkenswert ist die Tatsache, daß das Potentiometer keinen Einfluß auf die Blitzverzögerung hat. Wie bereits erwähnt, hängt diese nur von der Amplitudenhöhe des Steuersignals ab. Dieser Sachverhalt wurde an dieser Stelle auch kurz überprüft und ist in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Amplitude des Steuersignals [V]	Blitzverzögerung [µs]
2,5	24,87
3	15,8
5	13,3
8	12,8

Tabelle 3.1: Gemessene Abhängigkeit der Blitzverzögerung dt von der Amplitudenhöhe des Steuersignals. Im Rahmen der gesamten Arbeit wurde steht mit einem Steuersignal von 5 V gearbeitet.

Hier wurde jeweils nur ein Wert abgelesen, der lediglich den Trend aufzeigen soll, denn die Höhe des Steuersignals wurde bereits von Anfang an auf 5 V festgelegt. Die Werte wurden mit warmgelaufenem Gerät ermittelt und liegen daher über denen bei Standardbedingungen.

Statistische Auswertung von 1.000 Blitzereignissen

Das Stroboskop kann in einem Frequenzbereich von 0...50 Hz betrieben werden. Zuerst wurden im Frequenzbereich von 1 bis 50 Hz in Schritten von 1 Hz jeweils 1.000 Blitzereignisse untersucht.

Das Steuersignal für das Stroboskop wurde durch den Funktionsgenerator 33120A der Firma Agilent generiert. Hierbei handelt es sich um ein Rechtecksignal mit einer Amplitude und einem Offset von jeweils 2,5 V, das Signal pendelt also zwischen 0 und + 5 V. Die Frequenz wurde schrittweise variiert. Der Photodiodenverstärker wurde mit dem Netzgerät PL 330 der Firma Thurlby Thandar Instruments mit + 12 V, GND, -12 V versorgt.

Während der durchgeführten Messungen wurde der Lichtwellenleiter des Stroboskops bezüglich der Photodiode horizontal und vertikal so justiert, daß auf die Diode die maximale Lichtintensität auftraf. Die Diode war senkrecht über der Lichtaustrittsfläche des Lichtwellenleiters im Abstand von 20,5 cm fixiert.

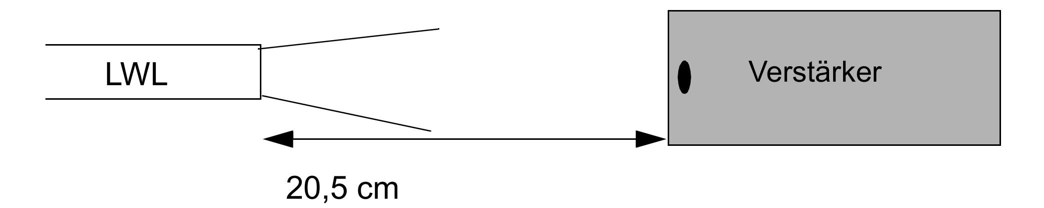


Abbildung 3.8: Skizze des Messaufbaus zur Charakterisierung des Stroboskops mit dem Photodiodenverstärker. Die Lichtaustrittsfläche des Lichtwellenleiters (LWL) hat einen Abstand von 20,5 cm zur Photodiode und wurde

Bei dieser Messung wurde die maximale Intensität des Stroboskops bei 1 Hz auf 5,5 V eingestellt. So liegt man bei 1 Hz auf jeden Fall im Dynamikbereich der Diode bzw. Verstärkerschaltung, welche bis maximal 6 V verstärkt. Wie die Intensität reguliert werden kann, wird in Kapitel beschrieben.

Frequenzmessungen basieren immer auf der Tatsache, daß der Zeitabstand zweier aufeinanderfolgender Signale gemessen wird. Dieser Zeitabstand stellt die Periodendauer und der Kehrwert davon die Frequenz dar.

Da die Intensität des Stroboskopes nach ca. 20 µs bereits vollständig abgeklungen ist (vgl. Abb. 3.4) und dieses Signal sich aber selbst bei 50 Hz erst alle 20 ms wiederholt, ist dies mit der integrierten Frequenz-Messfunktion des Oszilloskops nicht mit ausreichender Genauigkeit messbar. Deshalb muss die Zeitdifferenz zwischen zwei Kanälen gemessen werden, was mit Standard-Oszilloskopen nicht möglich ist.

Zur Aufzeichnung der Signale wurde das Oszilloskop LeCroy Waverunner LT 224 verwendet [8], dessen technische Daten dem Anhang A.1 zu entnehmen sind. Das Triggersignal des Funktionsgenerators wurde dabei auf Kanal 1 gelegt und auf Kanal 2 wurde das Signal der Diode geschalten. Das Oszilloskop wurde auf Kanal 1 getriggert. Über das Menü „measure tools“ werden die Funktionen „xamn“ (x-position at minimum: horizontal position associated with smallest data value) und „minimum“ (smallest data value) eingestellt.

Die Funktion „xamn“ liefert den Zeitabstand zwischen der aufsteigenden Flanke des Triggersignals (Kanal 1) und dem Zeitpunkt der maximalen Intensität des Diodensignals (Kanal 2) (vgl. Abb. 3.4). Da die Photodiodenschaltung eine negative Spannung liefert, wird zum Bestimmen dieses Wertes die Funktion „minimum“ benutzt, deren Betrag somit den maximalen Spannungswert der Intensität darstellt. Das Rechteck in Abb. 3.4 zeigt das Intervall an, in welchem die gewünschten Parameter ermittelt werden. Die Vorgabe eines solchen Bereichs ist aus mehreren Gründen sinnvoll:

- Falls mehrere ähnliche Ereignisse unmittelbar nacheinander auftreten, so kann der zu untersuchende Bereich gezielt eingegrenzt werden
- Die Parameter werden in diesem Bereich mit einer höheren Präzision ermittelt

- Das Oszilloskop benötigt weniger Speicherplatz und somit kann die Abtastrate, bzw. je nach Betriebsmodus, die Aufzeichnungsdauer erhöht werden

Es ist offensichtlich, dass sich das Stroboskop während der Betriebszeit aufheizt. Deshalb wurde zusätzlich der Temperaturverlauf mitprotokolliert. An dieser Stelle wurde allerdings darauf verzichtet, die Blitzlampe bei jeder Frequenz auf die gleiche Ausgangstemperatur zu bringen.

In Abb. 3.9 ist im oberen Bereich der Mittelwert der Zeitdifferenz dt zwischen der ansteigenden Flanke des Triggersignals und dem Maximalwert der Intensität dargestellt. Zu jedem Datenpunkt ist zuätzlich der jeweils höchste und niedrigste Wert, sowie die Standardabweichung durch Fehlerindikatoren aufgeführt.

Der Mittelwert der Blitzverzögerung liegt im Bereich zwischen 12,462 und 13,394 µs, die Standardabweichung zwischen 0,07 µs (0,56 %) und 0,277 µs (2,07 %).

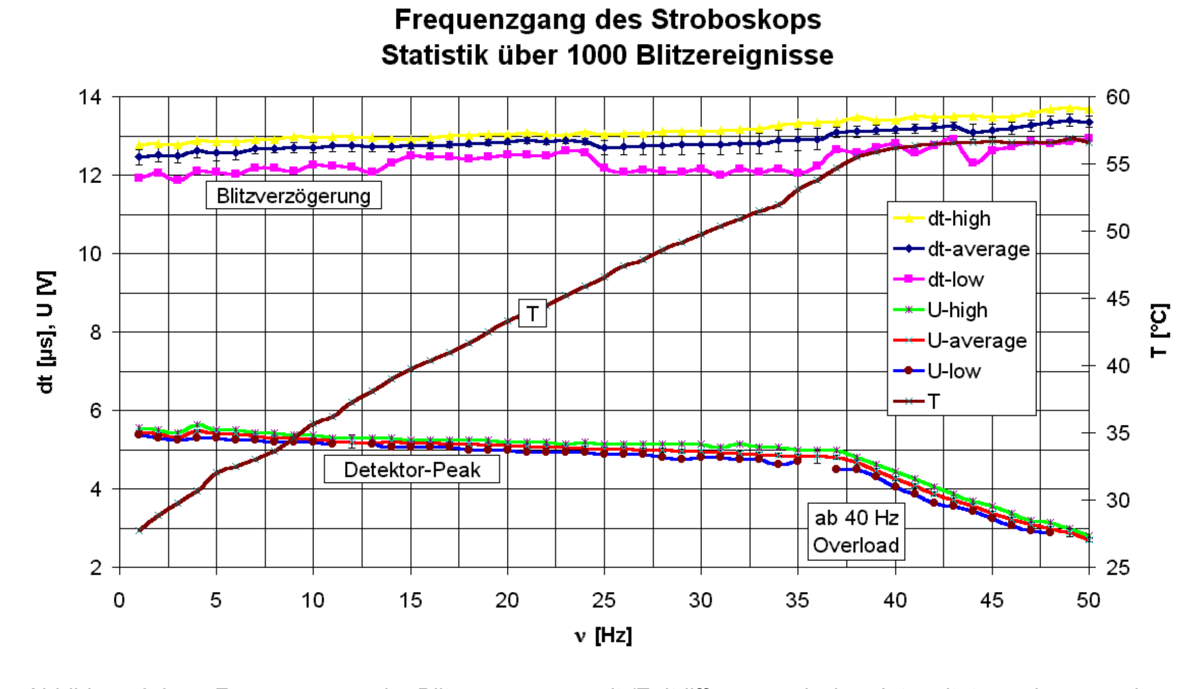


Abbildung 3.9: Frequenzgang der Blitzverzögerung dt (Zeitdifferenz zwischen Intensitätsmaximum und ansteigender Flanke des Steuersignals) und des Detektor-Peaks U (Intensität): Statistische Auswertung von jeweils 1.000 Blitzereignissen

Die Blitzverzögerung dt wird nicht durch die Frequenz, sondern durch die Temperatur bestimmt. Vergleicht man die Kurven 30 und 50 Hz, so tritt die selbe Blitzverzögerung immer bei den gleichen Temperaturen auf. Besonders deutlich wird dies, wenn man die Kurven in einem Diagramm darstellt, wie dies in Abb. 3.19 der Fall ist. Allerdings steigt die Temperatur bei höherer Frequenz schneller an, wodurch auch die Blitzverzögerung zunimmt. Da die CCD-Kamera (und somit auch das Stroboskop) in voller Auflösung aber mit maximal 8 Hz

betrieben wird, wird dieser Bereich nicht erreicht.

Die Standardabweichung der Blitzverzögerung ist maximal 2,07 %, betrachtet man diesen Wert jedoch als zeitliche Schwankung um den MIttelwert, so ist sie mit 277 ns fast dreimal so groß wie die gesamte Belichtungszeit der Kamera, die auf 100 ns festgelegt wurde.

Diese Schwankung um den Mittelwert bei gleichbleibender Temperatur ist laut Hersteller bei diesem System nicht veränderbar. Da es sich um eine Gasentladungslampe handelt, hängt dieser Jitter laut Hersteller stark von folgenden Faktoren ab:

- Geometrie der Blitzröhre
- Gasdruck in der Blitzröhre
- verwendete Elektroden
- zeitlicher Aufbau der erforderlichen Zündspannung

Dieser Jitter lässt sich auf dem Oszilloskop über die Display-Option „Nachleuchten“ beobachten: Hierbei werden alle aufgenommenen Kurven während eines bestimmten Messzeitraums (bis an die Grenze des internen Speichers) übereinandergelegt, und man kann somit Tendenzen erkennen, wie sich die eine Kurve im Vergleich zur anderen verhält. In diesem Fall ist eine periodische Schwankung des Signalverlaufs zu erkennen. Innerhalb von ca. 5 Sekunden bewegt sich die komplette Intensitätskurve periodisch um etwa +/- 150 ns um den Mittelwert.

Im unteren Bereich der Abb. 3.9 wird der Betrag des Peaks des Photodiodenverstärkers gezeigt. Es lässt sich erkennen, daß der Peak und somit die Intensität des Blitzes mit zunehmender Frequenz linear abnimmt. Im linearen Bereich bis 38 Hz bedeutet dies einen Abfall von 5,45 V auf 4,67 V, die Intensität beträgt bei 38 Hz also noch 86 % der Grundintensität von 1 Hz.

Ab 38 Hz fällt die Blitzintensität stark ab, was dadurch zu begründen ist, dass die Kondensatoren sich bei diesen hohen Frequenzen nicht mehr vollständig aufladen können, und somit das Intenstiätsmaximum nicht mehr erreicht wird. Bei 40 Hz zeigt auch die Kontrollleuchte am Gerät selbst „Overload“ an.

Zeitverlauf und Temperaturgang

Nun gilt es, das Verhalten des Stroboskops über einen längeren Zeitraum zu beobachten, bzw. die Blitzverzögerung gegenüber der Temperatur genauer zu betrachten. Für die Temperaturmessung wird das Temperaturmessgerät TL-309 eingesetzt, wobei der Messfühler direkt im Gehäuse des Stroboskops in unmittelbarer Nähe der Zündspule angebracht ist (vgl. Abb. 3.10), [9].

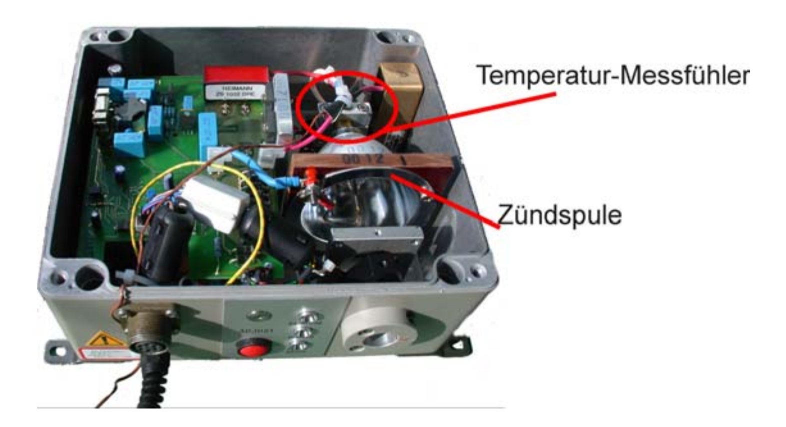


Abbildung 3.10: Blick in das Gehäuse des Stroboskops: Der Messfühler zum Erfassen der Temperatur wurde unmittelbar hinter der Zündspule befestigt.

Für das Wegschreiben der Messwerte des Oszilloskopes und des Thermometers wurde ein Testpoint-Programm entwickelt, dass im Sekundentakt die Werte ausliest und diese in eine .txt-Datei schreibt, die später mit Microsoft Excel weiterverarbeitet werden können.

Der zeitliche Verlauf der Blitzverzögerung und der Intensität, sowie der Temperaturerhöhung bei einer Blitzfrequenz von 1 Hz ist in Abb. 3.11 zu sehen. Abbildung 3.12 visualisiert das Verhalten der Blitzverzögerung in Abhängigkeit der Temperatur, wiederum bei 1 Hz. Die folgenden Grafiken 3.13 bis 3.18 veranschaulichen dieses Verhalten für höhere Blitzfrequenzen.

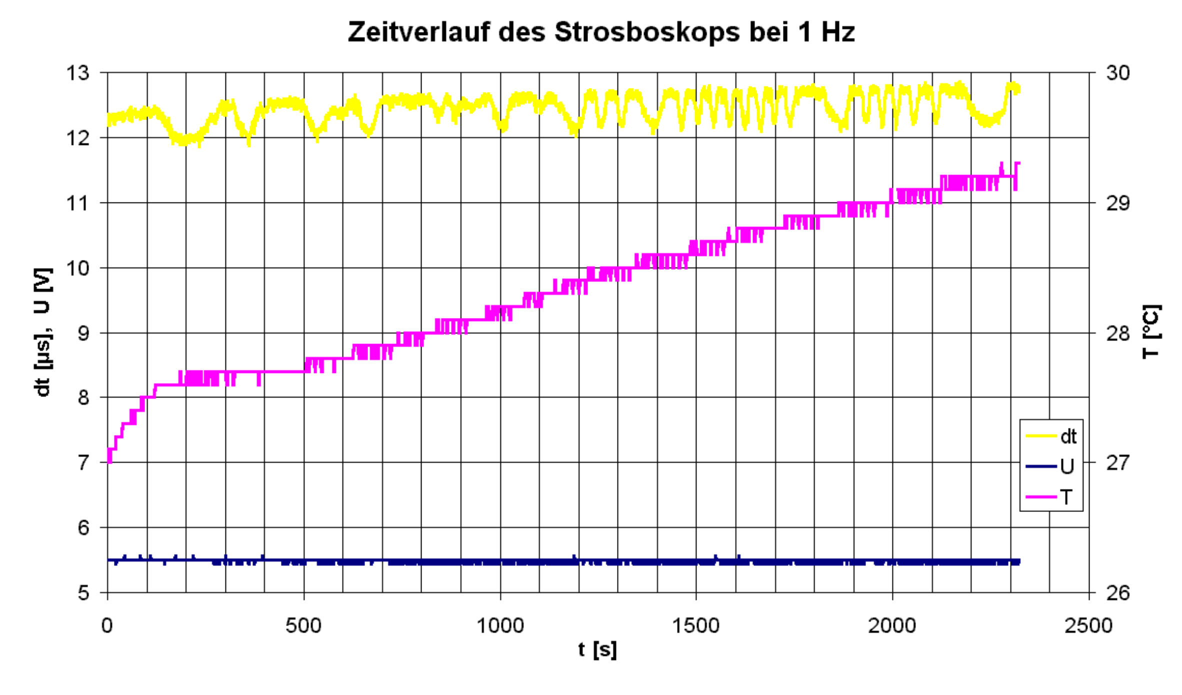


Abbildung 3.11: Zeitverlauf der Blitzverzögerung dt und des Detektor-Peaks U (Intensität) bei 1 Hz

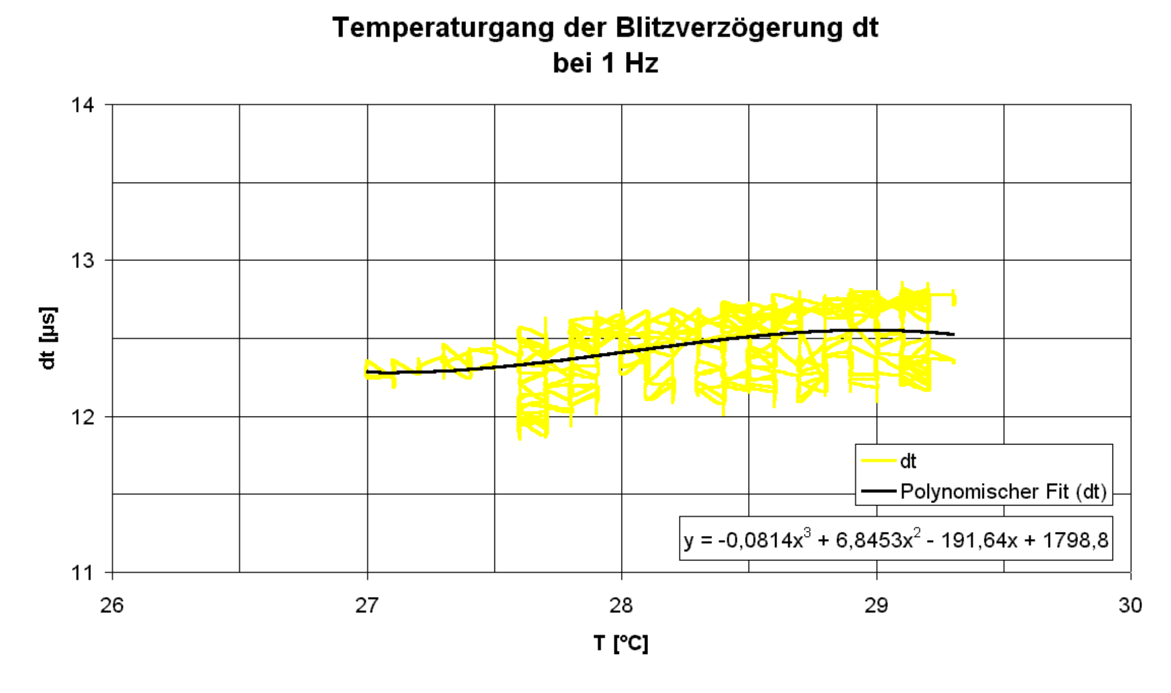


Abbildung 3.12: Temperaturgang der Blitzverzögerung dt bei 1 Hz. Das horizontale Springen der Linien liegt an der nicht eineindeutigen Zuordnung der Datenpaare. Bei der selben Temperatur sind aufgrund des JItters verschiedene Blitzverzögerungen messbar. Ebenso treten auch bei der selben Blitzverzögerung verschiedene Temperaturen auf.

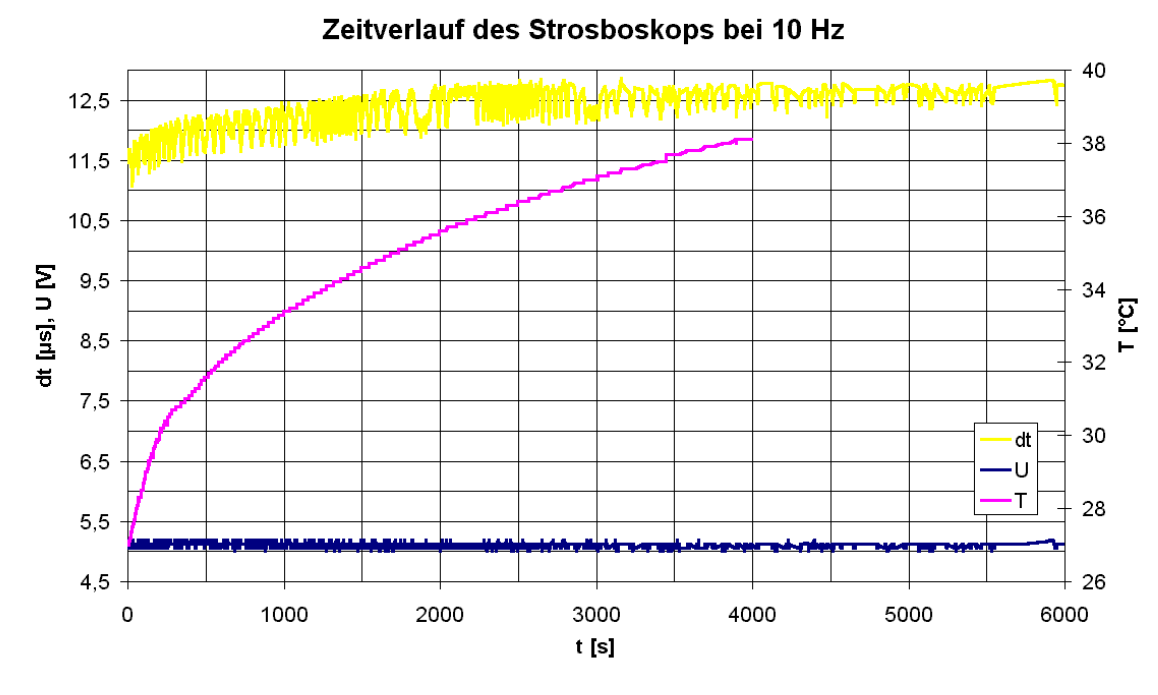


Abbildung 3.13: Zeitverlauf der Blitzverzögerung dt und des Detektor-Peaks U (Intensität) bei 10 Hz

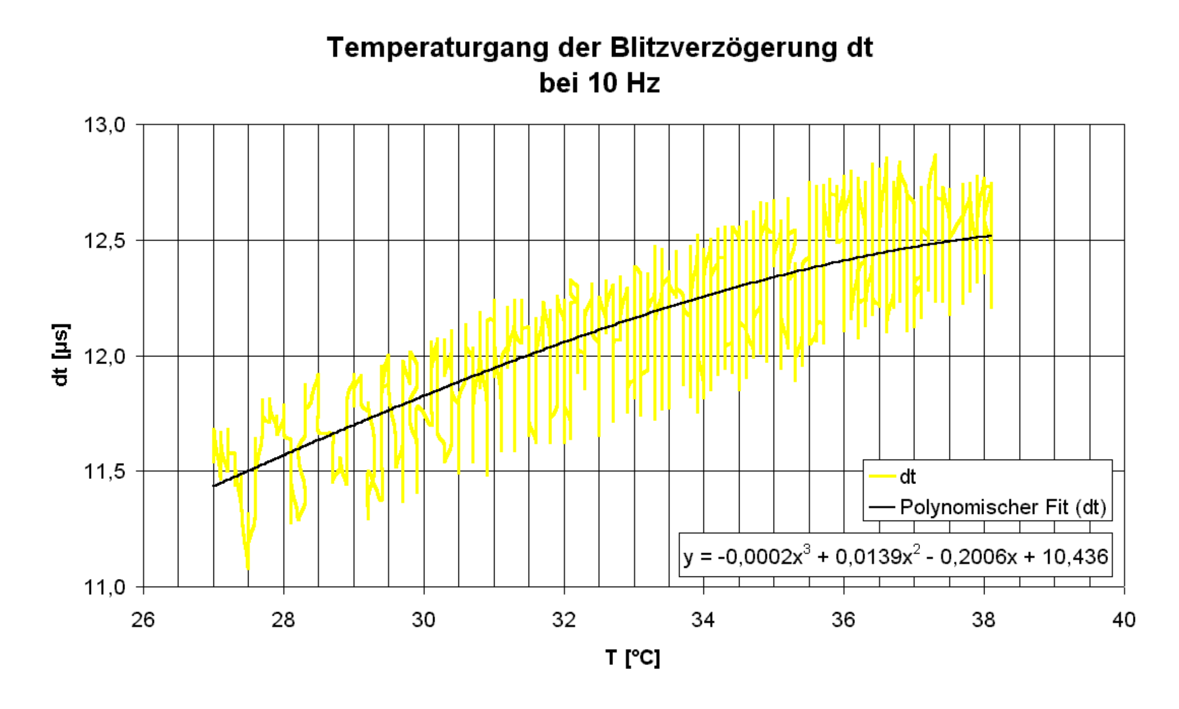


Abbildung 3.14: Temperaturgang der Blitzverzögerung dt bei 10 Hz

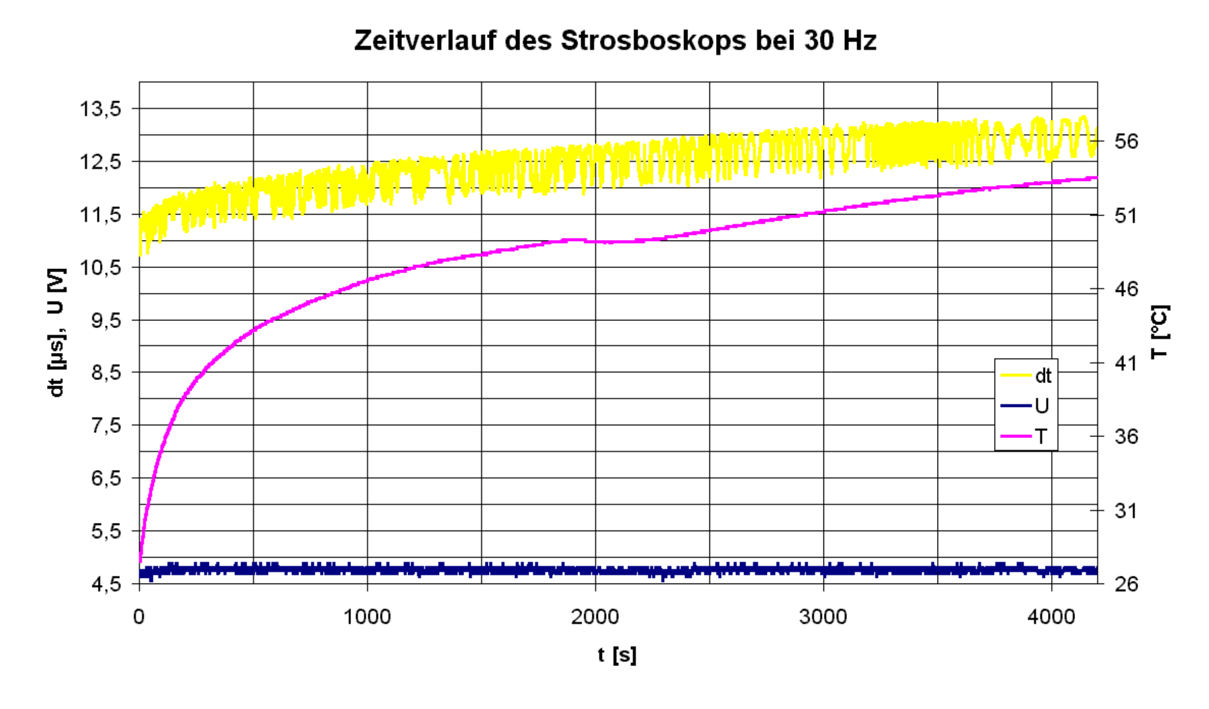


Abbildung 3.15: Zeitverlauf der Blitzverzögerung dt und des Detektor-Peaks U (Intensität) bei 30 Hz

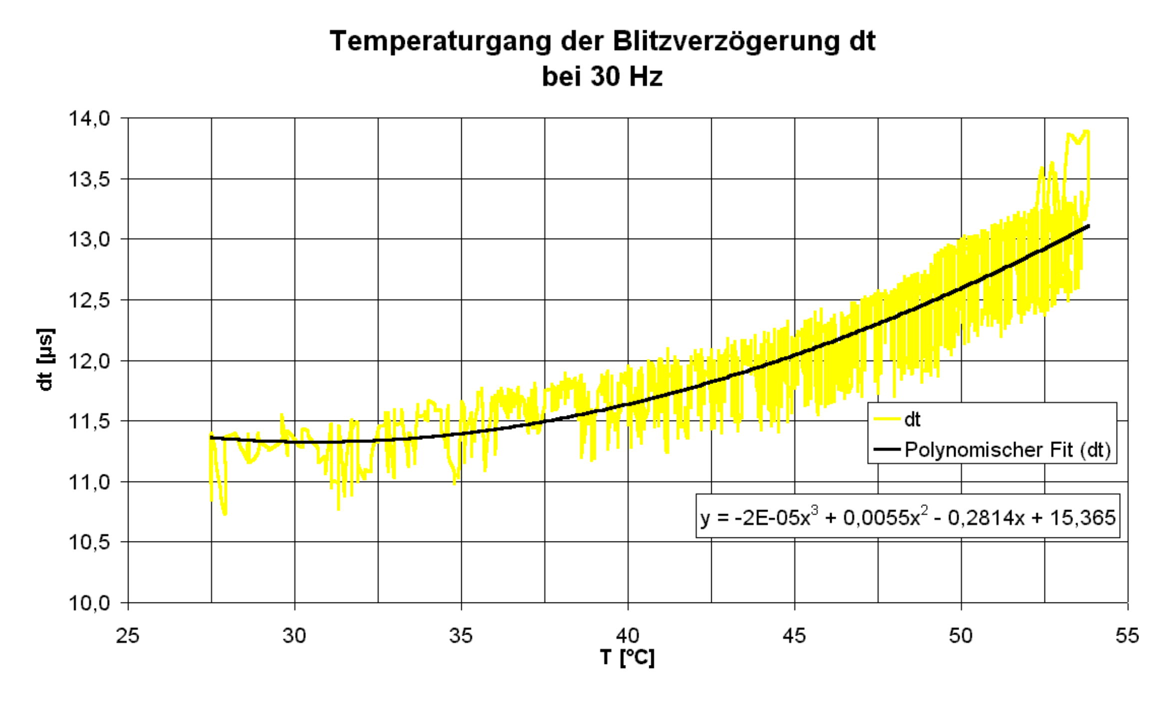


Abbildung 3.16: Temperaturgang der Blitzverzögerung dt bei 30 Hz

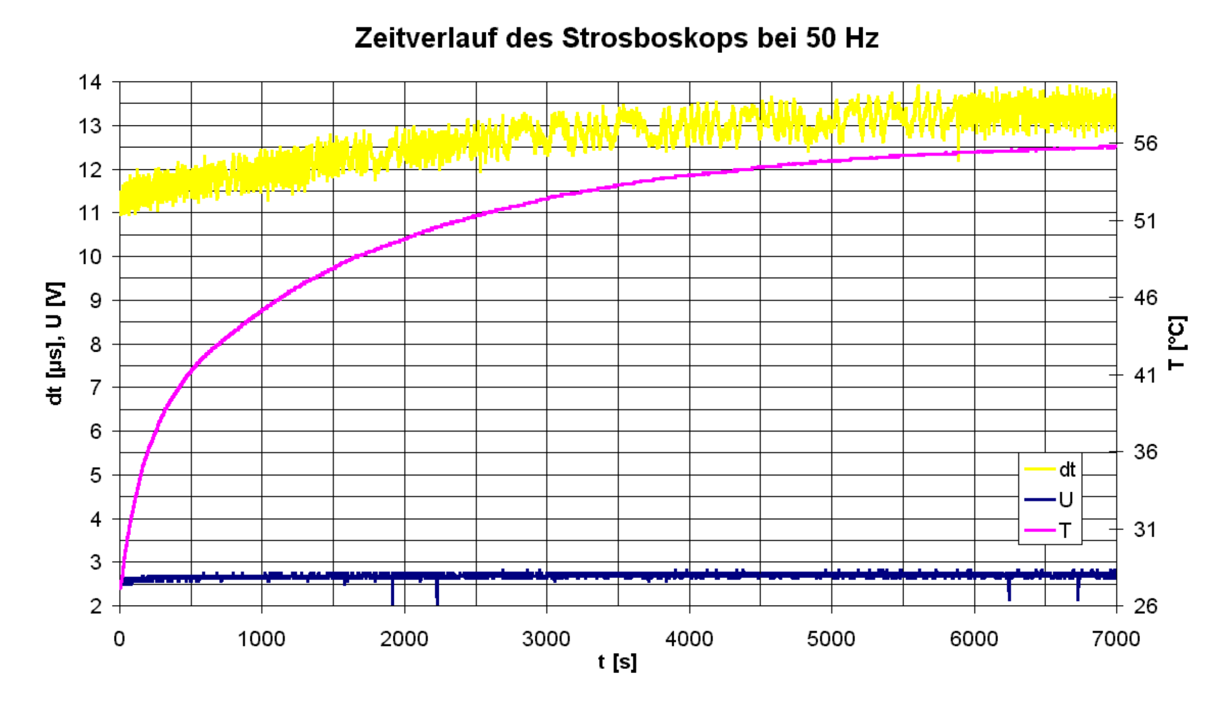


Abbildung 3.17: Zeitverlauf der Blitzverzögerung dt und des Detektor-Peaks U (Intensität) bei 50 Hz

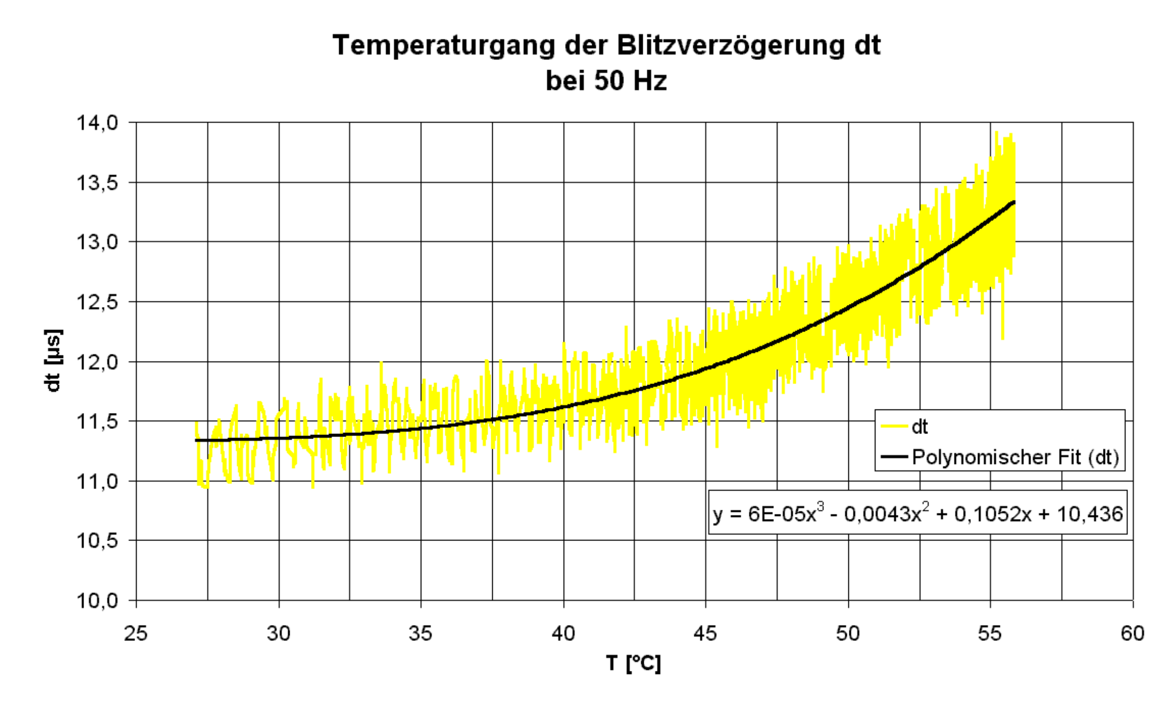


Abbildung 3.18: Temperaturgang der Blitzverzögerung dt bei 50 Hz

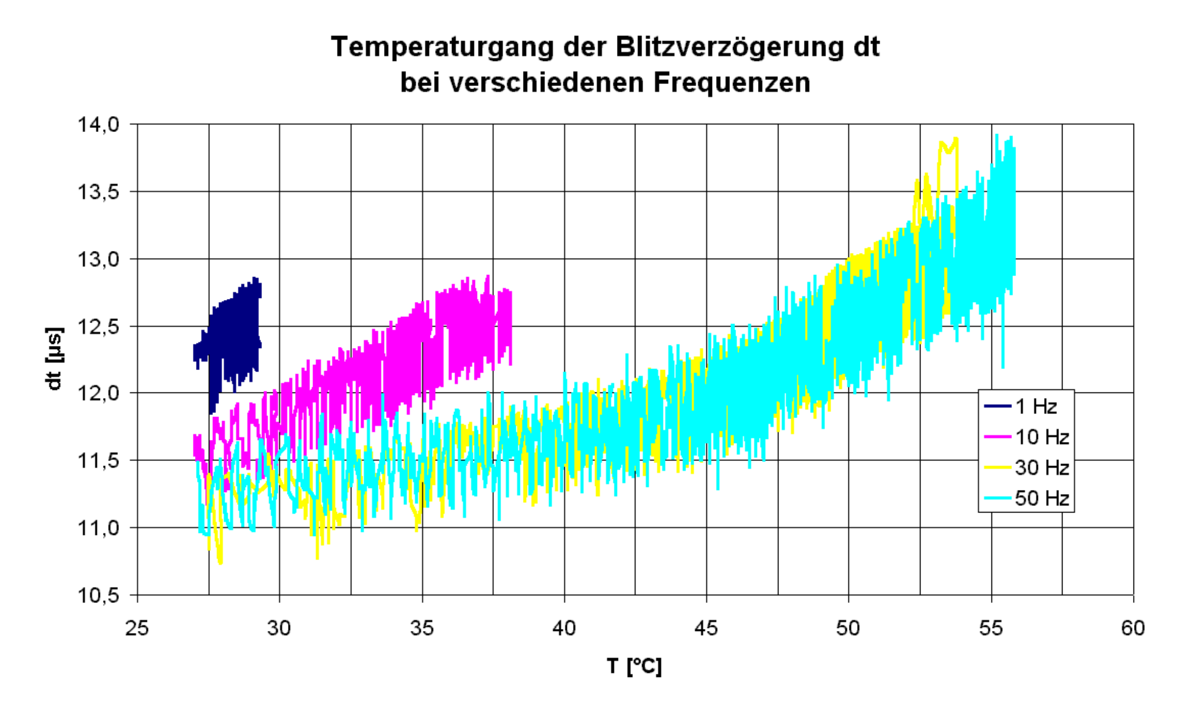


Abbildung 3.19: Zusammenstellung der Temperaturgänge verschiedener Frequenzen in einem Diagramm. Die Kurven 30 und 50 Hz liegen nahezu identisch übereinander. Die Kurven bei 1 und 10 Hz zeigen ein etwas anderes Verhalten. Daher sind diese Messungen zu bezweifeln.

Die unterschiedlichen Messdauern haben verschiedene Gründe. Wie aus Abb. 3.11 ersichtlich, erhöhte sich die Temperatur bei einer Repetitionsrate der Blitzlampe von 1 Hz nur ca. alle 100 Sekunden um 0,1 °C. Bei dem Schwanken der Temperatur um 0,1 °C während dieser 100 Sekunden handelt es sich um Quantisierungsrauschen des Thermometers, bzw. um die Auflösungsgrenze des Temperaturmessgerätes. Weil der Temperaturanstieg und damit auch die Zunahme der Blitzverzögerung dt in diesem Fall nur mäßig war, wurde die Messung nach ca. 40 Minuten beendet.

Die Messreihe bei 10 Hz wurde über einen Zeitraum von einer Stunde und 40 Minuten aufgenommen. Die Temperaturkurve endet hier allerdings bei 4.000 Sekunden (~ 1 Stunde], da das Temperaturmessgerät zu diesem Zeitpunkt noch nicht in die TestPoint-Steuerung eingebunden war, und der interne Speicher des Temperaturmessgerätes übergelaufen war. Aber auch hier ist erkennbar (vgl. Abb. 3.13), daß die Blitzverzögerung dt nach ca. 40 Minuten nicht mehr sonderlich anstieg. Auch hier blieb die Temperatur jeweils ca. 50 Sekunden konstant - bis auf das Quantisierungsrauschen des Thermometers.

Bei der nächsten Messung mit einer Blitzfrequenz von 30 Hz wurde auch nahezu zwei Stunden gemessen, allerdings standen ab ca. einer Stunde keinen korrekten Messwerte mehr zur Verfügung. Da die Blitzverzögerung dt mit zunehmender Temperatur größer wird, verschiebt sich infolgedessen die gesamte Intensitätskurve auf dem Bildschirm des Oszilloskops, wodurch diese aus dem Messbereich (Rechteck in Abb. 3.4) fällt.

Es werden zwar auch dann Messwerte ermittelt, diese unterscheiden sich aber deutlich von den zu erwartenden bzw. tatsächlichen Werten und sind somit eindeutig als Messfehler zu identifizieren und nicht repräsentativ für den wahren Zeitverlauf der Blitzverzögerung dt. Zwischen 10 und 11 μs treten für die Zeitdifferenz zwischen Triggersignal und Peak des Photodiodenverstärkers keine Werte auf. Folglich wurden alle Werte, die kleiner als 10 μs waren, entfernt, was ab 4.200 Sekunden ständig der Fall war. Deshalb endet die Zeitachse in Abb. 3.15 dort.

Für die abschliessende Messreihe bei 50 Hz wurde das zu untersuchende Intervall am Oszilloskop erneut angepasst und es konnte entsprechend der Zeitverlauf über einen Zeiraum von rund zwei Stunden aufgenommen werden (vgl. Abb. 3.17).

Folgende Tabelle 3.2 stellt die wichtigsten Ergebisse der Messungen noch einmal zusammen:

Messreihe	Zunahme der Blitzverzögerung dt von ... bis [µs]	Mittelwert der Intensität U [V]	Standard-abweichung der Intensität [%]
1 Hz	12,2...12,5	5,49	0,46
10 Hz	11,6...12,8	5,11	0,76
30 Hz	11,5...13,0	4,77	1,20
50 Hz	11,5...13,7	2,67	2,04

Tabelle 3.2: Zusammenstellung des Verhaltens von Blitzverzögerung dt (Zeitdifferenz zwischen Triggersignal und Detektor-Peak) und Intensität U (Betrag des Detektor-Peaks) bei verschiedenen Blitzfrequenzen

Festlegung der Blitzverzögerung zur Messplatz-Ansteuerung

Da die CCD-Kamera bei voller Auflösung mit maximal 8 Hz betrieben werden kann, ist dies auch die maximale Betriebsfrequenz des Stroboskops. Daher kommt die Messreihe bei 10 Hz dem realen Einsatz am nächsten, bzw. ist der hier ermittelte Wert der Blitzverzögerung der größte, der erwartet werden kann. Für die Messplatz-Ansteuerung musste nun ein geeigneter Wert dieser Blitzverzögerung festgelegt werden, der die Zeitdifferenz zwischen Steuertrigger des Stroboskops und dem Steuersignal für die Kamerabelichtung bestimmt.

Unmittelbar nach dem Einschalten des Gerätes beträgt die Blitzverzögerung im Mittel 11,5 µs, nach zehn Minuten Betriebszeit bei 10 Hz aber bereits 12 µs, bzw. 12,5 µs nach dreißig Minuten. Da der Messplatz bzw. das Experiment verschiedener Vorbereitungen bedarf, erfolgt der eigentliche Betrieb meist deutlich später als zehn Minuten nach dem Einschalten. Auch wenn das Stroboskop nicht blitzt, ist im eingeschaltenen Zustand eine Erwärmung festzustellen. Dieser Anstieg ist zwar deutlich geringer als während des Betriebs, aber bei langen Standzeiten können auch hier hohe Temperaturen erreicht werden.

Die abfallende Flanke des Intensitätsverlaufs des Stroboskops weist eine geringere Steigung auf als die ansteigende. Da die Helligkeitsschwankungen bei flacherem Intensitätsverlauf geringer sind als bei steil verlaufendem, ist eine Wartezeit über das Maximum hinaus geschickter, als eine die kleiner ist. Aus den durchgeführten Messungen ergibt sich als Mittelwert aller Mittelwerte, was einen typischen Wert darstellen dürfte, eine Zeitdifferenz von 12,877 µs. Deshalb wurde die Zeitdifferenz für die Ansteuerung der Kamera auf 12,8 µs festgelegt, wodurch die Bildaufnahme in der Zeit zwischen 12,8 und 12,9 µs erfolgt. Dieser Wert (12,8 µs) wird zwar bei 10 Hz auch nach einer Betriebszeit von einer Stunde und 40 Minuten noch nicht vollständig erreicht, ist aber, wie gezeigt, durchaus sinnvoll. Liegt die Blitzverzögerung aufgrund langer Betriebs- oder sehr langer Standzeiten evtl. doch höher, so würde eine geringere Wartezeit zu größeren Helligkeitsschwankungen führen als sie bei 12,8 µs auftritt.

Ausblick

Zur Kompensation des Temperaturdrifts der Blitzverzögerung dt könnten die in den Diagrammen angegebenen Funktionen der polynomischen Fits in TestPoint hinterlegt werden. Dazu müsste ein Thermometer (z.B. das angesprochene Temperaturmessgerät TL-309) ständig verfügbar sein und durch TestPoint kontinuierlich ausgelesen werden. Der wesentlich gravierendere Beitrag zum Schwanken in der Helligkeit von Bild zu Bild, der Jitter bei gleicher Temperatur, ist damit allerdings nicht zu beheben. Die Zunahme der Blitzverzögerung aufgrund der Temperatur macht sich nicht von BIld zu Bild, sondern erst über einen längeren Zeitraum bemerkbar, und kann von Zeit zu Zeit durch die Auto-Range-Funktion der Kamera-Software angepaßt werden. Um einen allgemeingültigen Fit in TestPoint hinterlegen zu können, müsste der Temperaturgang bei niederen Frequenzen nochmals überprüft werden.

3.2 CD-Antrieb (Player)

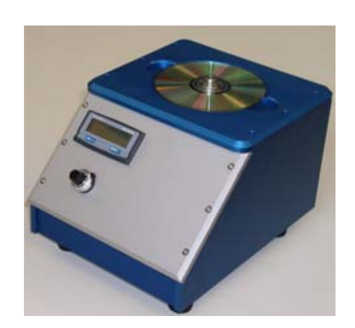


Abbildung 3.20: Speziell für den Bio-Disk-Messplatz angefertigter CD-Player

3.2.1 Anforderungen und Konzept

Der CD-Antrieb soll in der Lage sein mit bis zu 10.000 U/min zu rotieren. Die Regelung des Players soll definiert über einen PC erfolgen. Außerdem muss bereits der CD-Player selbst eine Information über die Drehgeschwindigkeit der CD liefern.

Am HSG-IMIT[1] wurde dies folgendermaßen realisiert: Bei dem Motor handelt es sich um ein Gerät der Firma Faulhaber, Typ: 3056K012B K312-K1155. Dieser wird von einem Motion Controller (Faulhaber MCBL 2805, ein leistungsstarker 16-Bit Mikrocontroller) gesteuert [10]. Der Motion Controller verfügt über eine RS232-Schnittstelle, über die ihm per PC die Soll-Drehzahl vorgegeben werden kann.

Intern wird die reale Frequenz des Motorachse über Hallsensoren ausgelesen und mit dem Sollwert verglichen. Der Motion Controller regelt so die Drehzahl ständig nach. Die Steuerung unterstützt auch die Vorgabe von Rampen. Hierzu wird dem Controller der Wert

1. Hahn-Schickard-Gesellschaft - Institut für Mikro- und Informationstechnik, Villingen-Schwenningen; www.hsg-imit.de, Kooperationspartner des Lehrstuhls und Partner im Projekt Bio-Disk

der zu erzielenden Frequenz in U/min und die Beschleunigung in U/s² bzw. Hz/s vorgegeben. Die Regelung dieser Rampe wird dann vollständig durch den Controller übernommen.

Direkt an die Achse des Motors ist ein optischer Impulsgeber (siehe Abb. 3.21a), der Encoder OPTO HEDS 5540C14, Firma Faulhaber, gekoppelt. Dieser Encoder gibt pro Umdrehung der Motorachse einen TTL-kompatiblen Impuls auf die BNC-Buchse an der Rückseite des Players aus. Das Signal wird dabei durch eine Metallscheibenblende erzeugt, welche pro Umdrehung das Licht einer LED auf eine Photodiode durchläßt.

Um den wachsenden Bedürfnissen im Laufe des Projektes gerecht werden zu können, existiert noch ein weiterer CD-Player, der nach und nach modifiziert werden kann. Dieser verfügt z.B. über eine weitere BNC-Buchse, die ein zusätzliches Signal mit 100 Impulsen pro Umdrehung ausgibt, welches ebenfalls vom Encoder generiert wird. Anhand der 100 Pulse pro Umdrehung ließe sich dann der Player durch Zählen dieser Pulse (ausgehend vom Nulldurchgangssignal) auf bestimmte Parkpositionen mit einer Auflösung von 3,6 ° regeln. Um innerhalb dieser 3,6° zum Stillstand zu kommen, müsste sich der Player allerdings langsam drehen oder das Abbremsen müsste entsprechend schnell erfolgen.

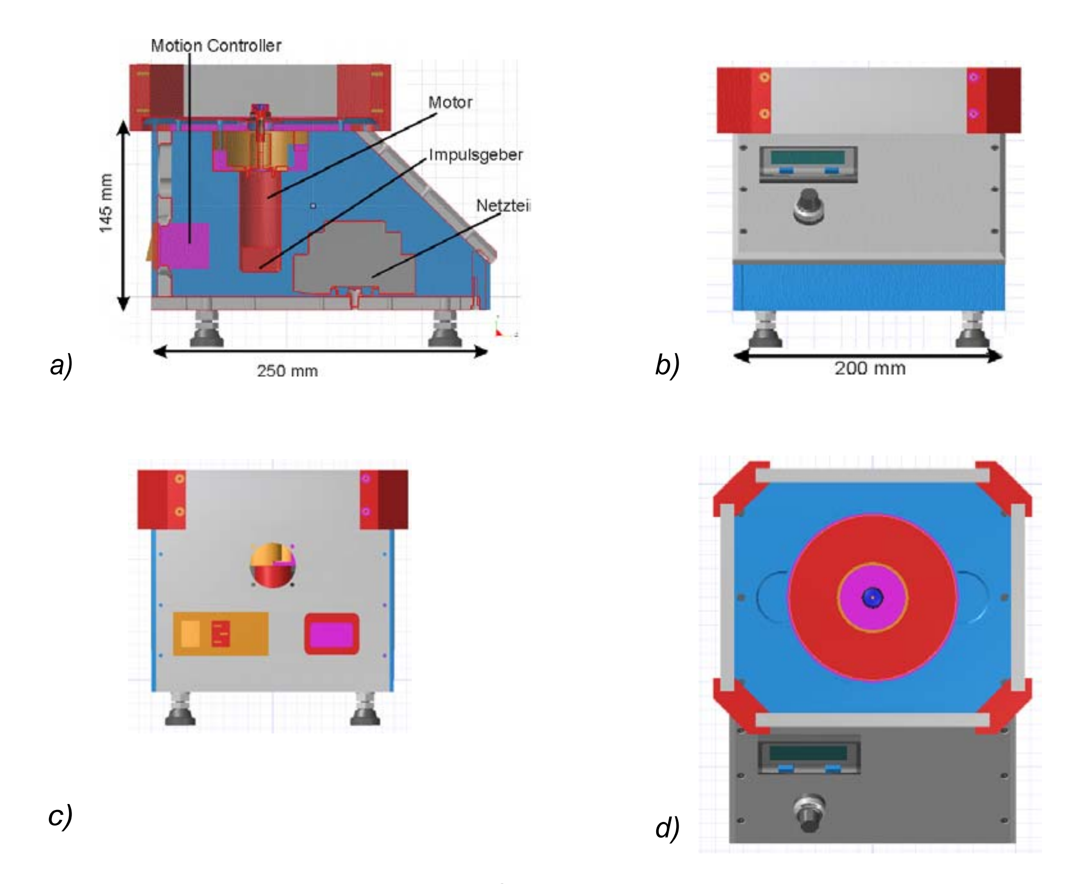


Abbildung 3.21: Konstruktionszeichnungen des CD-Players. Abbildung a) zeigt, wo der Impulsgeber angebracht ist. Der aufgesetzte, rechteckige Kasten dient der Sicherheit und ist zurgleich ein sinnvoller Spritzschutz.

3.2.2 Evaluierung des CD-Players

Für die Charakterisierung der Experimente, die mit dem Messplatz durchgeführt werden sollen, ist die genaue Kenntnis über

- die Frequenzstabilität,
- das Einschwingverhalten,
- sowie das Verhalten beim Beschleunigen und Abbremsen (Schlupf)

des CD-Players von großem Interesse.

Am Beispiel der Charakterisierung von hydrophoben Barrieren soll die Wichtigkeit dieser Punkte kurz begründet werden:

In der Nähe des Rotationszentrums der CD befinden sich Reservoire, die eine gewisse Menge einer Flüssigkeit aufnehmen können. Die Reservoire sind mit Kanälen, die sich in überwiegend radialer Richtung auf der CD ausbreiten, verbunden. Befüllt man nun einen solchen Kanal und bringt die CD zur Rotation, so bewegt sich die Flüssigkeit aufgrund der Zentrifugalkraft in radialer Richtung nach außen.

Durch hydrophobe Beschichtungen und Variation der Geometrie an bestimmten Positionen im Kanal soll die Flüssigkeitsfront aufgehalten, bzw. frequenzabhängig durchgeschalten werden können. Bei der Charakterisierung solcher Barrieren geht es um die Ermittlung der Durchbruchsfrequenz bei verschiedenen Kanalgeometrien. Deshalb ist eine stabile und genau bekannte Frequenz des CD-Players unerlässlich.

Allgemein gilt für die Charakterisierung der Experimente, die mit dem Messplatz durchgeführt werden sollen, daß reproduzierbare Bedingungen vorherrschen müssen. Wenn sich die CD anders verhält als die Motorachse, die das Frequenzsignal liefert - also wenn die CD auf der CD-Halterung der Achse rutscht (schlupft) - so kann es sein, daß bestimmte Ereignisse innerhalb eines Experimentes in Wirklichkeit zu anderen Zeiten oder Bedingungen aufgetreten sind, als dies protokolliert wurde. Deshalb wurde untersucht, ab welchen Beschleunigungswerten, bzw. CD-Gewichten Schlupf auftritt, d.h. ab wo die CD der Frequenz der Drehachse des Motors nicht mehr folgen kann.

Weiterhin ist die Kenntnis über das Einschwingverhalten des CD-Players von großem Interesse. Entstehen beim Beschleunigen oder Abbremsen zu große Überschwinger, so würden diese das Experiment ebenfalls unkontrolliert beeinflussen. Außerdem sollen die maximal erzielbaren Beschleunigungen ermittel werden. Zunächst wird die Frequenzstabilität über der Zeit untersucht.

Frequenzstabilität

Die Messung wurde ähnlich durchgeführt wie die Messung der Zeitverläufe und Temperaturgänge des Stroboskops. Die Vorgabe der Frequenz erfolgt mit der TestPoint-Steuerung des Messplatzes, die dem Motion Controller den Sollwert der Frequenz über die RS232-Schnittstelle übergibt. Das TTL-kompatible Nulldurchgangssignal der BNC-Buchse des CD-Players wurde auf Kanal 1 und Kanal 2 des LeCroy Oszilloskopes gelegt, getriggert wurde wiederum auf Kanal 1. Gemessen wurde der zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Pulsen des Nulldurchgangssignals. Hierfür wurde der Parameter „delay“ (time from the trigger / t = 0 to the first 50 % transition) im Menü „measure tools“ des LeCroy Oszilloskops eingestellt. Außerdem wird die Pulsbreite („width“), sowie die Amplitudenhöhe („maximum“) mitprotokolliert. Abbildung 3.22 verdeutlicht dies anhand der Anzeige des LeCroy-Oszilloskops bei der Messreihe von 20 Hz.

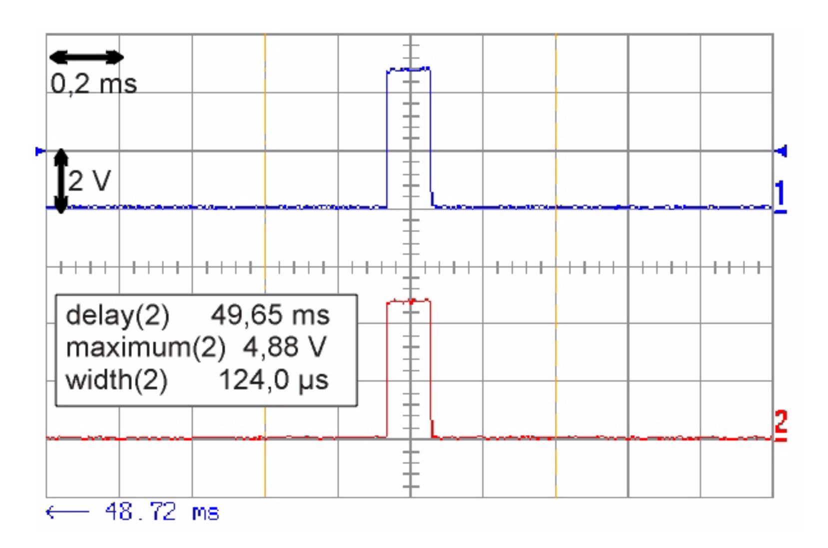


Abbildung 3.22: Das Bild zeigt den Bildschirm des LeCroy-Oszilloskops bei den Frequenzmessungen des CD-Players. Bei den beiden Kurven handelt es sich um das selbe Signal, welches auf Kanal 1 und Kanal 2 gelegt wurde. Gemessen wird der zeitliche Abstand der aufsteigenden Flanke des unteren Rechtecks (Kanal 2) zur aufsteigenden Flanke des Triggers (Kanal 1), welcher nach links aus dem Bild verschoben wurde.

Für die Erfassung der Messdaten wurde das TestPoint-Programm der Stroboskop-Messung entsprechend abgeändert, wodurch hier die Messwerte „delay“, „maximum“ und width“ wiederum in einer .txt-Datei zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung stehen. Die Berechnung der Frequenzen aus den ermittelten Zeitdifferenzen zweier Nulldurchgangspulse erfolgt dann in Microsoft Excel.

Mit dem Player 1 wurden die in Tabelle 3.3 aufgeführten Messreihen gefahren - jeweils über 10 Minuten bei den Frequenzen 1, 1.5, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 und 167 Hz. Die Alu-CDs wurden bis auf die Dicke mit denselben Abmessungen einer Stan-

dard-CD gefräst Der Bereich um das Loch im Mittelpunkt der CDs wurde auf die Dicke von Standard-CDs gefräst, um die CDs auf der Halterung des Players befestigen zu können.

Art der Messung	Dicke [mm]	Gewicht [g]
ohne CD	-	-
Standard-CD	1,2	15...18
Alu-CD, leicht	2	57,45
Alu-CD, schwer	5	144,90

Tabelle 3.3: Für die Messreihen verwendete CD-Variationen

Zum Vergleich gibt Tabelle 3.4 einen Überblick über die derzeit verwendeten Bio-Disks, die entweder aus Trockenresist-beschichteten Standard-CDs oder PMMA-Platten auf einem Alu-Träger bestehen. Weil hier CDs mit Alu-Trägern zum Einsatz kommen, ist dies ein weiter Grund den Player auch mit den Alu-CDs zu untersuchen. Die Gewichte der CDs wurden mit der Waage BL1500S von Sartorius ermittelt.

	Dicke [mm]	Gewicht [g]
auf Standard-CD	1,3...1,5	16...22
2 PMMA-Platten, verklebt	~ 2,5	~ 35
2 PMMA-Platten, auf Alu-CD geschraubt	~ 7,5	~ 195

Tabelle 3.4: Überblick der derzeit verwendeten Bio-Disks

Die Frequenzsstabilität ist in den Grafiken 3.23 bis 3.26 exemplarisch gezeigt. Die Mittelwerte der verschiedenen CDs liegen bei allen Frequenzen nahe beieinander. Mit zunehmendem CD-Gewicht wird die Standardabweichung aufgrund der Masse, bzw. Massenträgheit geringer, die Kurve wird geglättet.

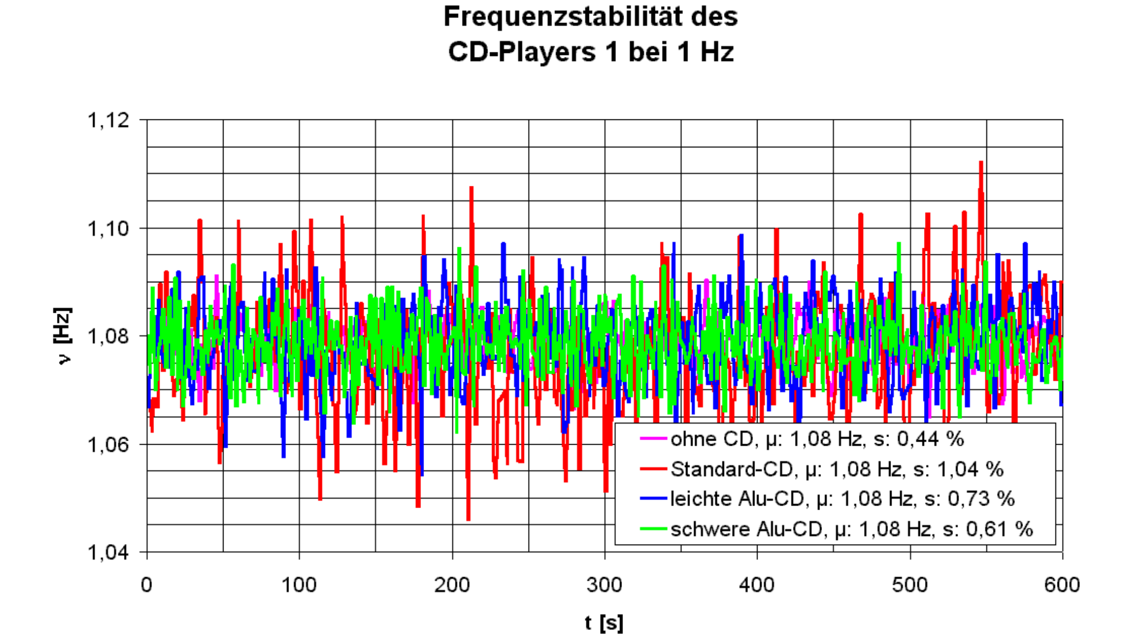


Abbildung 3.23: Frequenzstabilität: Frequenz-Zeitverlauf des CD-Players über 10 Minuten bei 1 Hz und verschiedenen CD-Parametern. μ = Mittelwert, s = Standardabweichung

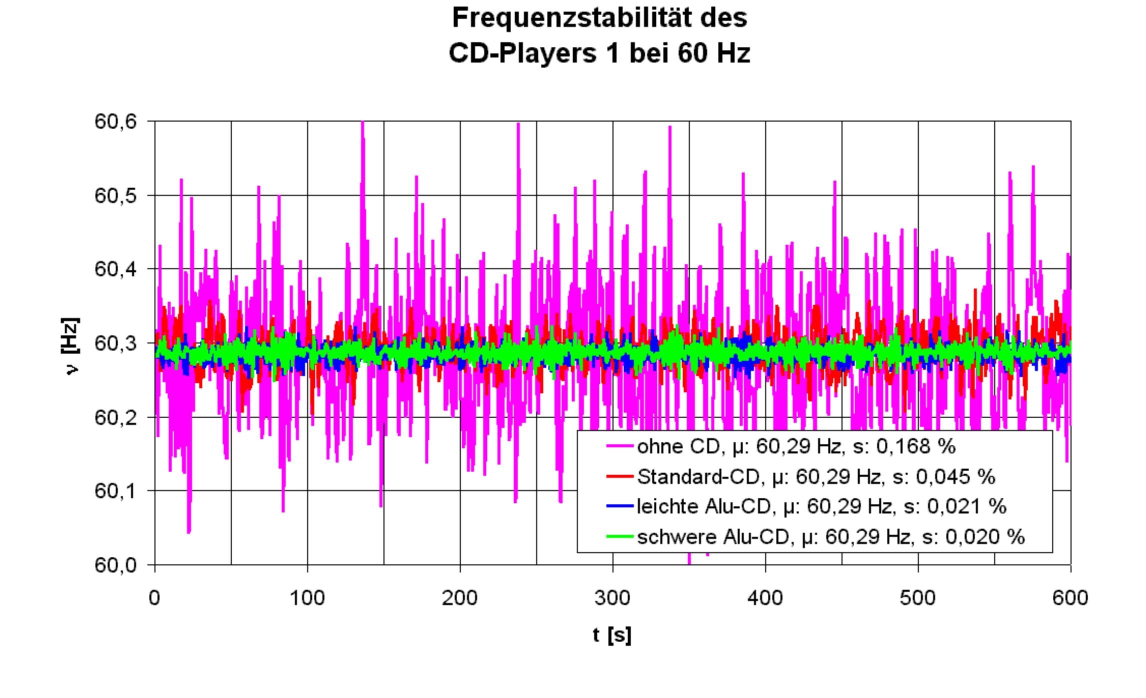


Abbildung 3.24: Frequenzstabilität: Frequenz-Zeitverlauf des CD-Players über 10 Minuten bei 60 Hz und verschiedenen CD-Parametern. μ = Mittelwert, s = Standardabweichung

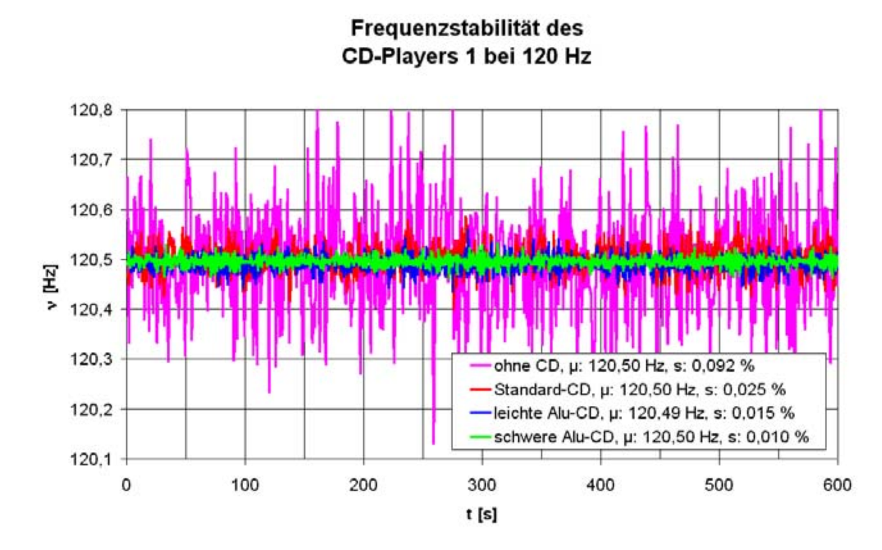


Abbildung 3.25: Frequenzstabilität: Frequenz-Zeitverlauf des CD-Players über 10 Minuten bei 120 Hz und verschiedenen CD-Parametern. μ = Mittelwert, s = Standardabweichung

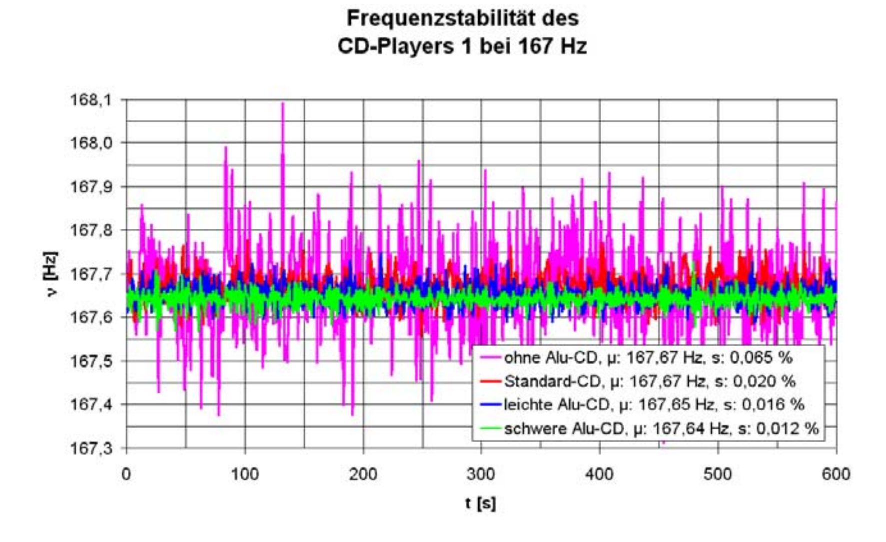


Abbildung 3.26: Frequenzstabilität: Frequenz-Zeitverlauf des CD-Players über 10 Minuten bei 167 Hz und verschiedenen CD-Parametern. μ = Mittelwert, s = Standardabweichung

Die Abbildung 3.27 zeigt, daß v.a. bei niederen Frequenzen die tatsächliche Drehfrequenz unabhängig vom CD-Gewicht knapp 8 % vom Sollwert abweicht. Der Motion Controller hat die Aufgabe, die Motorachse auf eine vorgegebene Regel-Größe zu bringen und dort zu halten. Im einfachsten Fall verstärkt ein solcher Regler den Wert der Abweichung.vom Sollwert. Die Kunst der Regelungstechnik besteht darin, die Parameter so einzustellen, dass die Elektronik mit maximaler Verstärkung arbeitet, aber sicher nicht schwingt. Unter diesen Umständen ist der hier gezeigte Verlauf durchaus akzeptabel [11].

Die ermittelte Frequenz-Schwankung des CD-Players ist mit einer Standardabweichung von maximal 1,04 % sehr gering. Betrachtet man diese Schwankung aber als Standardab-

weichung der Periodendauer, so ergeben sich bei 1 Hz Zeitschwankungen des Nulldurchgangstriggers von bis zu 9,64 ms bei der Standard-CD. Dies kann dazu führen, daß die aufgenommen Bilder nicht immer den selben Bildausschnitt zeigen, da die Messplatz-Steuerung den Zeitpunkt der Bildaufnahme in Bezug auf den letzten Nulldurchgangspuls vorausberechnet. Ein bestimmter Punkt auf der CD kann aber in dieser Zeit aufgrund der Schwankung der Periodendauer mehr oder weniger Weg zurückgelegt haben. Dieser Sachverhalt wird in Kap. 4.3 näher untersucht.

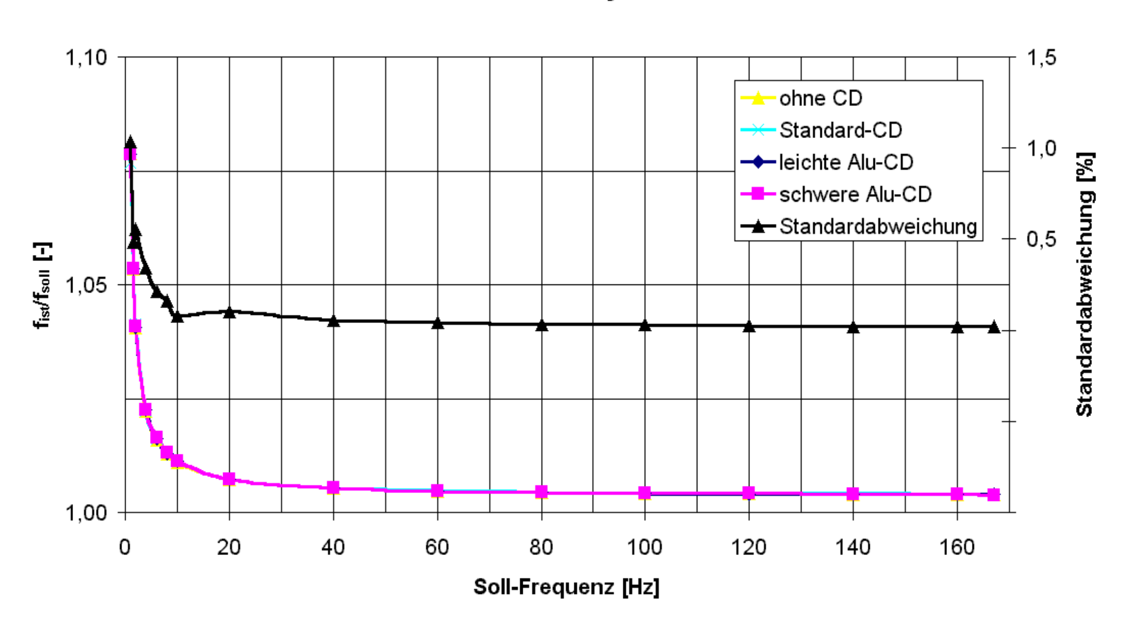


Abbildung 3.27: Verhältnis zwischen der vorgegebenen Frequenz und dem tatsächlich erreichten Mittelwert der Drehfrequenz, sowie Standardabweichung in % dieses Mittelwertes. Da die Standardabweichungen der einzelnen Messreihen sehr gering sind, liegen bei dieser Skalierung alle Kurven übereinander.

Als der Player 2 kurzzeitig zur Verfügung stand, wurde auch hier die Frequenzstabilität mit der Standard-CD und ohne CD untersucht. Der geringfügig andere Verlauf (geringere Standardabweichung, größere Abweichung des Mittelwerts bei hohen Frequenzen) ist in Abb. 3.28 zu sehen.

Bei zunehmenden Frequenzen wird auch die Impulsbreite des Nulldurchgangstriggers geringer, da sich die Öffnung der Metallscheibenblende des Impulsgebers schneller an der detektierenden Photodiode vorbeibewegt. Da dieses Signal mit der ADwin-Karte erfaßt und weiterverarbeitet werden muss, ist es sinnvoll, den genauen Verlauf, der in Abb. 3.29 dargestellt ist, zu kennen.

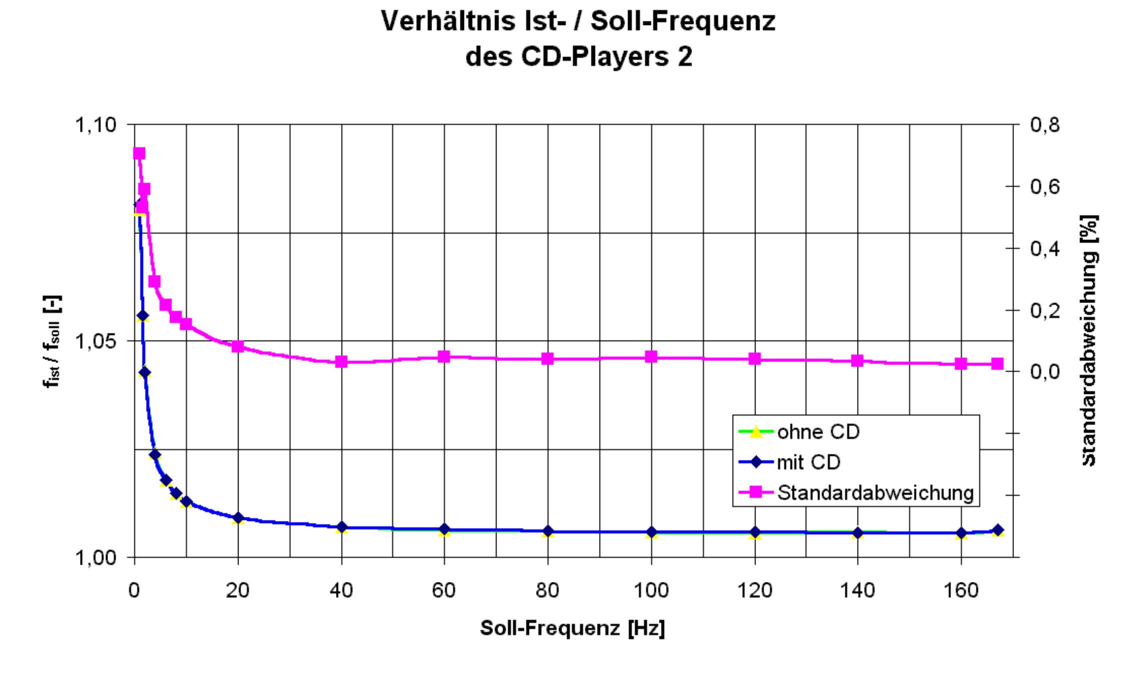


Abbildung 3.28: Verhältnis zwischen vorgegebener und tatsächlicher Frequenz des zweiten Players.

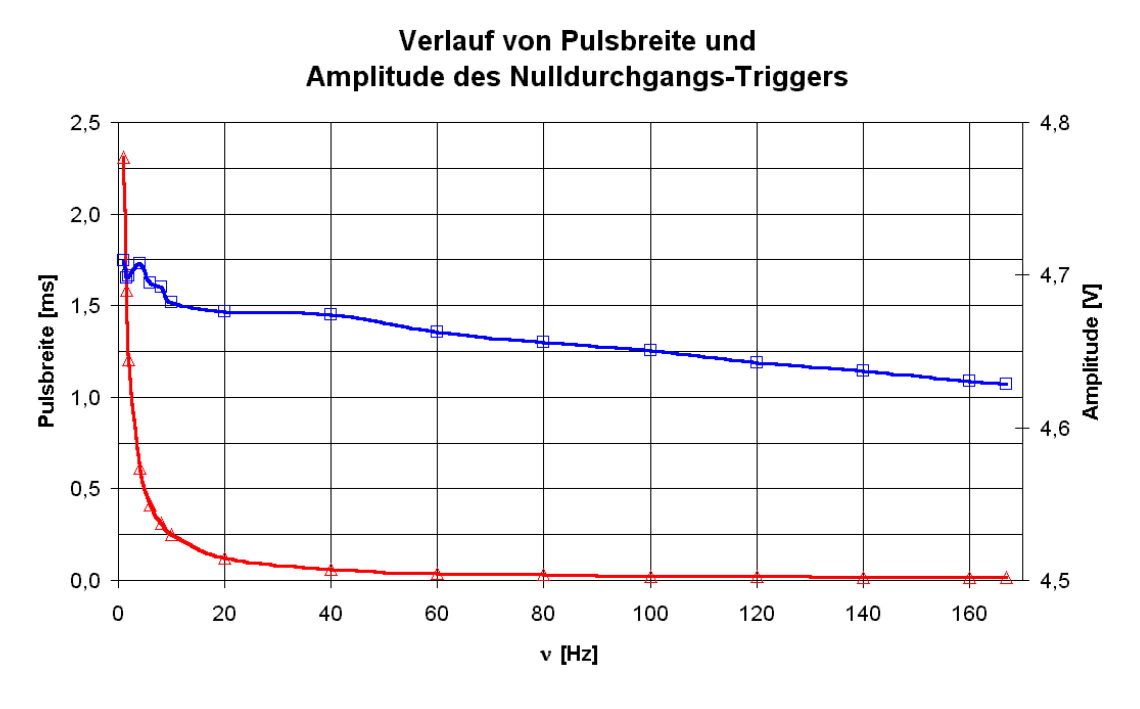


Abbildung 3.29: Verlauf der Pulsbreite und der Amplitude des Nulldurchgangssignals

Einschwingverhalten

Hier wurden dem Motion Controller des CD-Players ebenfalls mit der TestPoint-Steuerung verschiedene Beschleunigungsrampen, sowie die zu erreichende Enddrehzahl vorgegeben. Zur Aufzeichnung der Ist-Frequenz wurde hier das von der ADwin-Karte und in der TestPoint-Steuerung protokollierte Nullduchgangssignal verwendet. So kann über einen beliebig langen Zeitraum der zeitliche Verlauf der Frequenz mit einer Abtastrate bis zu 8 Hz (aufgrund der Programmierung der ADwin) erfasst werden.

Würde man die Signale mit dem Oszilloskop erfassen, so müsste man die Daten wieder per GPIB mit TestPoint einlesen, um den zeitlichen Verlauf darstellen zu können,. DIes ist aber bedeutend langsamer. Für diese Messung ist die beschriebene Vorgehensweise also durchaus praktikabel.

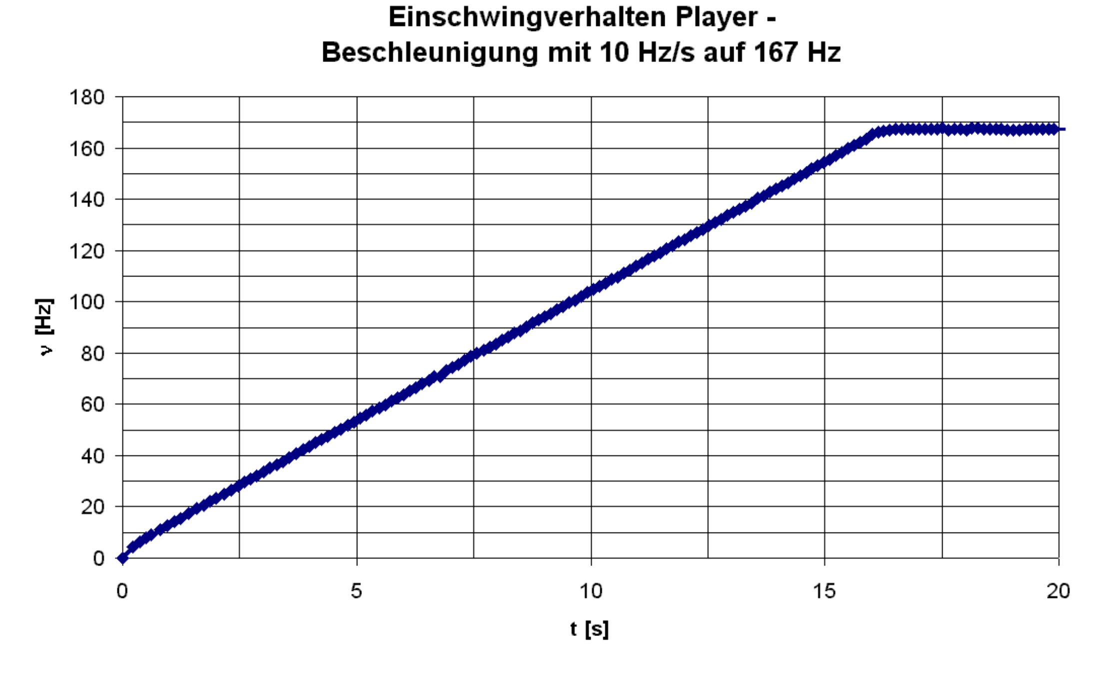


Abbildung 3.30: Einschwingverhalten des CD-Players beim Beschleunigen mit 10 Hz/s auf 167 Hz

Wie in Abb. 3.30 zu sehen ist, folgt der Player sehr gut der vorgegebenen Rampe, und beschleunigt in der zu erwartenden Zeit von

$$t = \frac{v}{a} = \frac{167\ Hz \cdot s}{10\ \mathrm{Hz}} = 16,7\ \mathrm{s}$$, mit a = Beschleunigung in Hz/s.

Beschleunigt man mit 10 Hz/s auf 100 Hz, so beträgt die Beschleunigszeit entsprechend 10 Sekunden. Dem Motion Controller kann eine maximale Beschleunigung von 30.000 Hz/s vorgegeben werden. Abbildung 3.31 gibt einen Überblick der durchgeführten Messungen bei einer Enddrehzahl von 167 Hz. Es wurde die größte zu erreichende Enddrehzahl gewählt, da sich dabei das Verhalten, bzw. die Zeit zum Erreichen dieser

Drehzahl, am genauesten analysieren läßt. Man erkennt, daß die maximal mögliche Beschleunigung, welcher der Player noch nachkommt, bei 250 Hz/s liegt. Bei höheren Beschleunigungen wird zwar steiler auf die Enddrehzahl geregelt, aber nicht in der zu erwartenden Zeit. Diese Aussage gilt auch für niedrigere Enddrehzahlen, was z.B. für 100 Hz nochmal überprüft wurde.

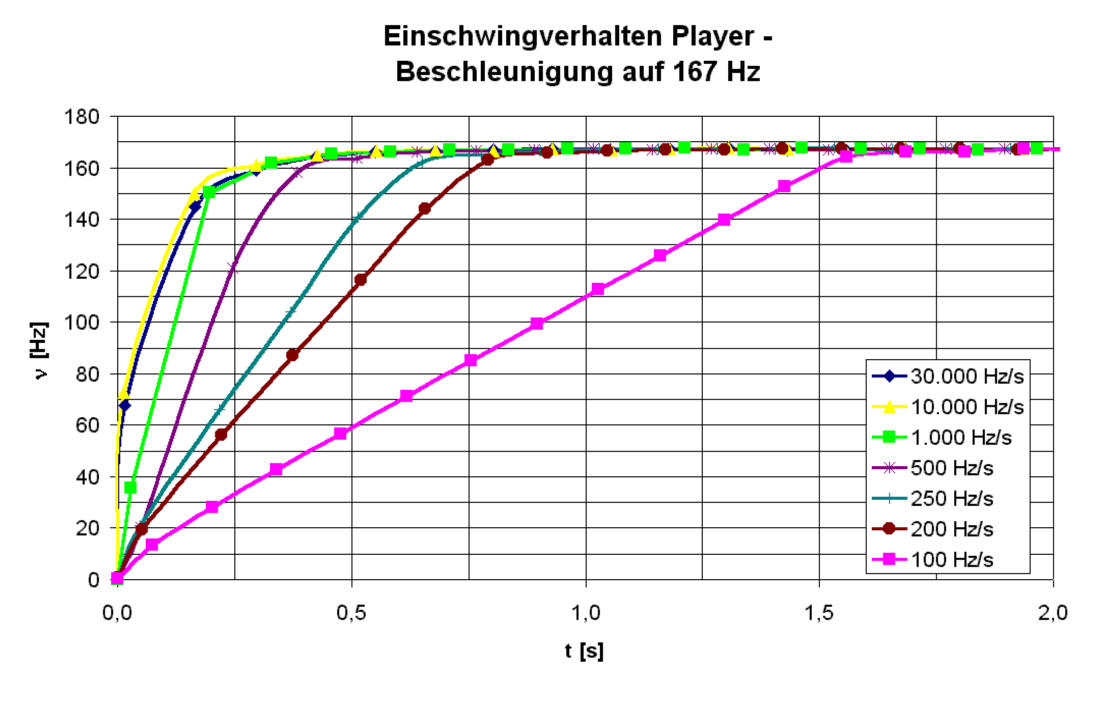


Abbildung 3.31: Einschwingverhalten des CD-Players beim Beschleunigen mit verschiedenen Rampen auf 167 Hz

Wie die Grafik 3.31 zeigt, weist das Einschwingverhalten auch bei hohen Beschleunigungen keine Überschwinger auf, was für den Einsatz dieses Motors im Bio-Disk-Messplatz spricht. Anzumerken ist die Tatsache, daß beim Abbremsen steilere Rampen als 250 Hz/s zu erreichen sind.

Schlupf

Die CDs werden durch eine spezielle Klemmvorrichtung auf dem Player befestigt. Für die Haftung sorgt ein im Drehteller eingelegter Silikonring. Im folgenden wurde untersucht, ab welchen Beschleunigungen ein gewisser Schlupf auftritt, also ab wann die CD auf der Halterung rutscht und somit die Ergebnisse eines durchgeführten Experiments in Frage zu stellen sind. Die CDs wurden gegenüber der Motorachse mit einem Strich markiert, welcher bei sukzessiv erhöhten Beschleunigungen mit der CCD-Kamera beobachtet wurde (vgl. Abb. 3.32). Die Enddrehzahl spielt dabei keine Rolle, lediglich in der Beschleunigungsphase wirkt eine gewisse Kraft.



Abbildung 3.32: Blick auf die Achse des CD-Players, die gegenüber der CD mit einem Strich markiert wurde, um die Bedingungen für Schlupf zu ermitteln.

Bei Standard-CDs, bzw. Bio-Disks auf Standard-CDs mit einem Gewicht bis zu 22 g konnte auch bei Beschleunigungen von 10.000 Hz/s (beim Abbremsen) kein Schlupf festgestellt werden. Nachdem die Haftreibungskraft überwunden wurde, tritt bei den leichten Alu-CDs ab einer Beschleunigung zwischen 15 und 17 Hz/s schlagartig ein Schlupf von ca. 10° auf. Bei den schweren Alu-CDs ist dieser Schlupf bereits ab 4 bis 6 Hz/s zu beobachten. Die größte Winkelverschiebung von ca. 100° ereignete sich bei der schweren Alu-CD mit einer Beschleunigung von 10.000 Hz/s - steilere Rampen haben keinen weiteren Einfluß.

Hält man sich entweder an die angegebenen Beschleunigungs-Grenzwerte oder setzt man eine CD mit einem geringfügig höheren Gewicht einer Standard-CD ein, so steht der Durchführung eines reproduzierbaren Experiments von seiten des Schlupfs nichts im Wege.

Ausblick

Interessant wäre noch das Verhalten beim Aufbringen von Unwuchten zu klären. Da hier die Schwankung der Drehfrequenz mit Sicherheit größer wird, ist auch ein größeres azimutales Bildspringen zu erwarten (siehe Kap. 4.3). Falls Interesse besteht, so ließe sich aus der Kurve der Ist/Soll-Frequenz auch eine Fit-Funktion zur Kompensation der überhöhten Frequenzen ermitteln, welche in TestPoint hinterlegt werden könnte.

3.3 CCD-Kamera

3.3.1 Anforderungen

Die Kanalgeometrien auf den Bio-Disks liegen bei einer Größenordnung um 100 µm. Für die Untersuchung von Mischprozessen ist es erforderlich die Fluide auch in den Kanälen beobachten zu können, was eine Auflösung von deutlich kleiner 100 µm auch während der

Rotation erforderlich macht. Als Auswahlkriterium für eine geeignete Kamera muss daher auf eine sehr geringe Belichtungszeit geachtet werden. Grafik 3.33 verdeutlicht am Beispiel einer Belichtungszeit von 100 ns, die die eingesetzte Kamera erreicht, welchen Weg s die zu beobachtenden Strukturen bei verschiedenen Radien und Drehfrequenzen zurücklegen. Im schlechtesten Fall, also am Rand der CD bei höchster Drehfrequenz bewegt sich ein bestimmter Punkt während 100 ns um

$$s = v \cdot t = \omega \times r \cdot t = 2 \cdot \Pi \cdot \upsilon \times r \cdot t$$

$$= 2 \cdot \Pi \cdot 167\ Hz \times 0,06\ \mathrm{m} \cdot 0,1\ \mu s = 6,28\ \mu m$$

in azimutaler Richtung unter der Kamera weiter.

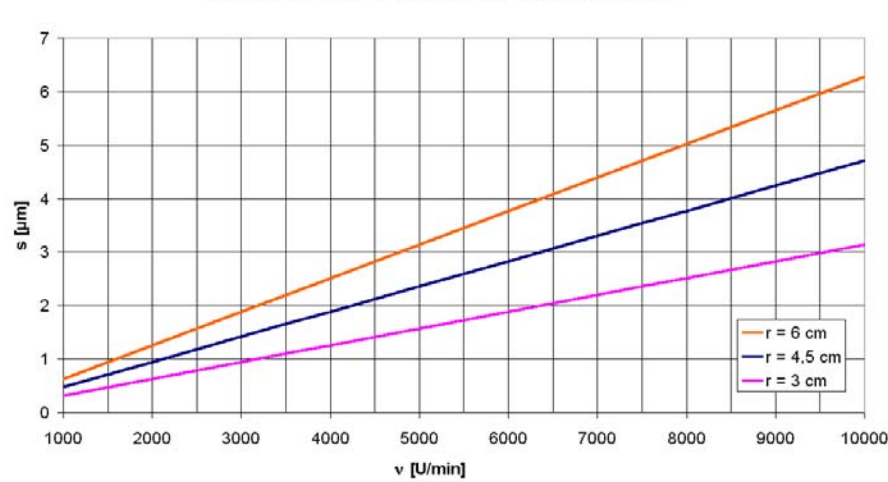


Abbildung 3.33: Berechnete, azimutale Verwischung der aufgenommen Bilder bei einer Belichtungszeit von 100 ns und verschiedenen Radien.

Das bedeutet, daß sämtliche Strukturen auf der Aufnahme um diese 6 µm breiter erscheinen als in Wirklichkeit und damit verschmiert aussehen. Größere Belichtungszeiten sind daher inakzeptabel, wodurch die Wahl auf die CCD-Kamera SensiCam FastShutter SVGA der Firma PCO Computer Optics GmbH fiel [12]. Hierbei handelt es sich um eine extern triggerbare Kamera mit hoher Auflösung und der geforderten niedrigen Belichtungszeit von 100 ns. Die Billdwiiederholrate liegt bei voller Auflösung bei nur 8 Hz, kann aber



Abbildung 3.34: PCO SensiCam FastShutter SVGA

durch das sogenannte Binning gesteigert werden. Durch das Binning werden mehrere Pixel durch Mittelwertbildung der Helligkeitswerte zu einem Pixel zusammengefaßt, wodurch sich die Auslesezeit des CCD-Chips verkürzen läßt. Im Anhang A.2 sind die Abhängigkeiten der Bildwiederholrate angegeben, die Im Handbuch nicht zu finden sind.

Technische Daten

- Pixel-Anzahl 1280 x 1024
- Pixel-Größe 6.7 x 6.7 µm²
- A/D-Auflösung 12 bit
- Wiederholrate 8 fps (full frame)
- Belichtungszeit 100 ns...1 ms
- Binning, horizontal / vertikal 1...8 / 1...32 Pixel
- Optischer Eingang C-mount
- Smear < 0,005 %

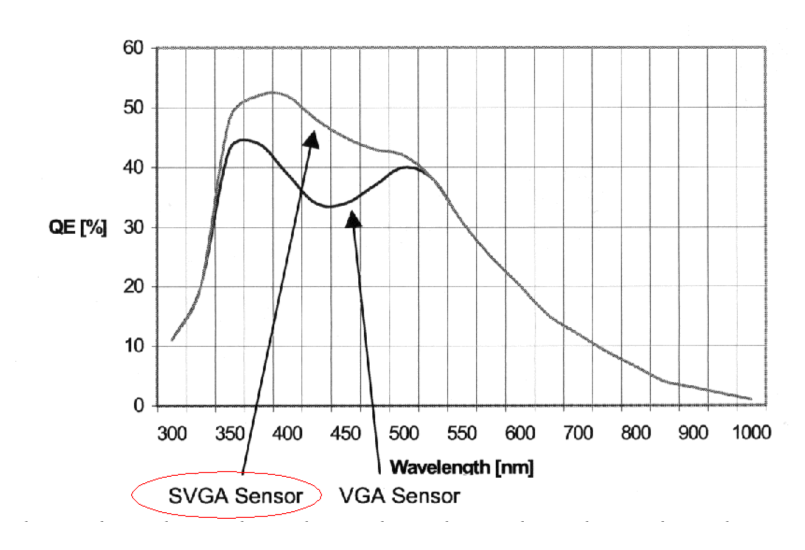


Abbildung 3.35: Spektraler Sensitivitätsverlauf der PCO SensiCam FastShutter SVGA

3.3.2 Evaluierung der CCD-Kamera

Abbildung 3.36 zeigt verschiedene Aufnahmen mit einer Belichtungszeit von 100 ns bei diversen Frequenzen. Deutlich ist zu erkennen, daß bei zunehmenden Frequenzen die Bilder stärker verwischt werden. Dennoch ist die Struktur mit der Breite von 165 µm auch auf dem Bild, welches bei 10.000 U/min - der größten Frequenz des CD-Players - und bei einem Radius von r = 5 cm aufgenommen wurde, gut sichtbar. Auch die halbe Kanalbreite kann noch gut wahrgenommen werden und so würde man Flüssigkeitsfronten eindeutig erkennen können.

Für den in Abb. 3.36 dargestellten Kanal der Breite 165 µm wurde in der Aufnahme ohne Rotation der CD (nicht abgebildet) mIt Corel PhotoPaint ein Pixelabstand von 60 Pixel ermittelt - ein Pixel entspricht also $\frac{165\ \mu m}{60} = 2,75\ \mu m$. Im Bild 3.36.c) ist diese Struktur ca. 63 Pixel breit, wobei sich die genauen Grenzen aufgrund der Verwischung allerdings nicht klar definieren lassen. Somit ist eine Verwischung von 3 Pixeln, bzw. 8,25 µm gegenüber dem Standbild entstanden, was dem weiter oben berechneten Wert sehr nahe kommt. Die Kamera arbeitet also tatsächlich mit der geforderten Belichtungszeit von 100 ns.

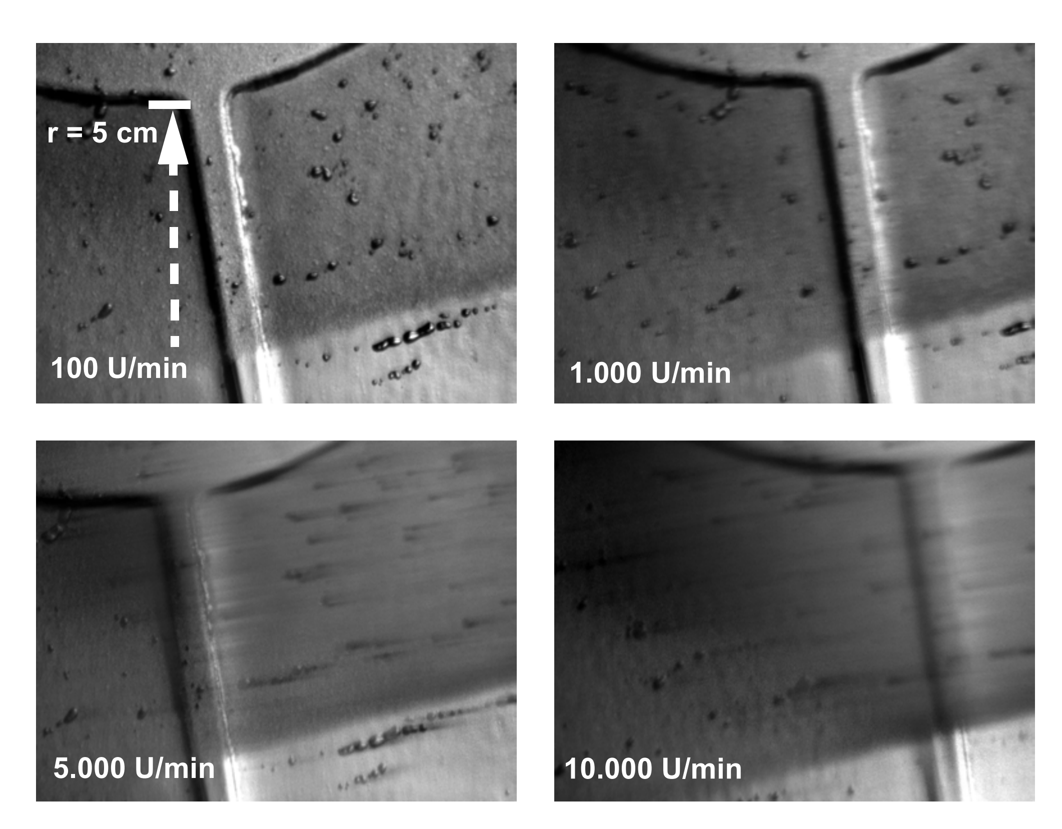


Abbildung 3.36: Mit einer Belichtungszeit von 100 ns aufgenommene BIlder bei verschiedenen Frequenzen.. Die zunehmende Verwischung bei hohen Frequenzen ist deutlich erkennbar. Trotzdem ist die Struktur auch bei 10.000 U/min noch gut sichtbar. Kanalbreite: 165 µm. 2,52-fache optische Vergrößerung

In Abb. 3.37 wurden Photos mit variablen Belichtungszeiten aber bei konstanter Drehfrequenz gemacht. Auch hier ist die Verbreiterung der Struktur ersichtlich. Außerdem sind die Bilder mit größeren Belichtungszeiten deutlich heller, da der CCD-Chip die vorhandene Lichtintensität über einen längeren Zeitraum aufintegriert.

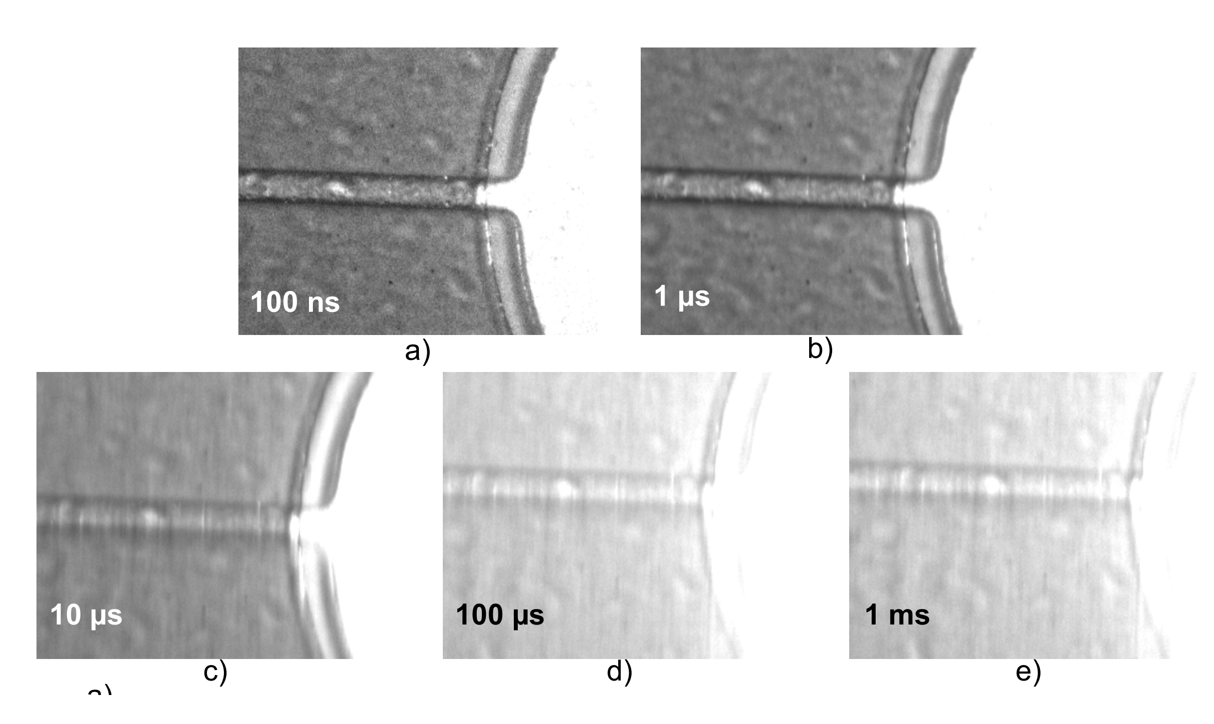


Abbildung 3.37: Mit unterschiedlichen Belichtungszeiten aufgenommene BIlder bei einer Drehfrequenz von 100 Hz. Im Bild e) ist eine Verwischung / Verbreiterung der Kanalstruktur gegenüber a) deutlich wahrnehmbar. Hier wird v.a. auch erkennbar, daß das Bild mit zunehmender Belichtungszeit heller wird, weil mehr Lichtintensität auf den CCD-Chip trifft. Dies läßt sich aber durch die AutoRange-Funktion der Kamera-Software ausgleichen.

3.4 Linearantrieb

Bei dieser Komponente handelt es sich um einen Schlitten, der sich auf einer Schiene hin- und herbewegen kann. Auf diesem Schlitten ist das Mikroskop mit CCD-Kamera montiert, um die CD entlang des gesamten Radius vollständig beobachten zu können (vgl. Abb. 3.38). Der Schlitten wird über eine Schneckenwelle durch den Motor der Firma maxon angetrieben. Die Ansteuerung des Motors übernimmt der Controller SM300 von SM Elektronik [13], [14], [15], [16], [17].

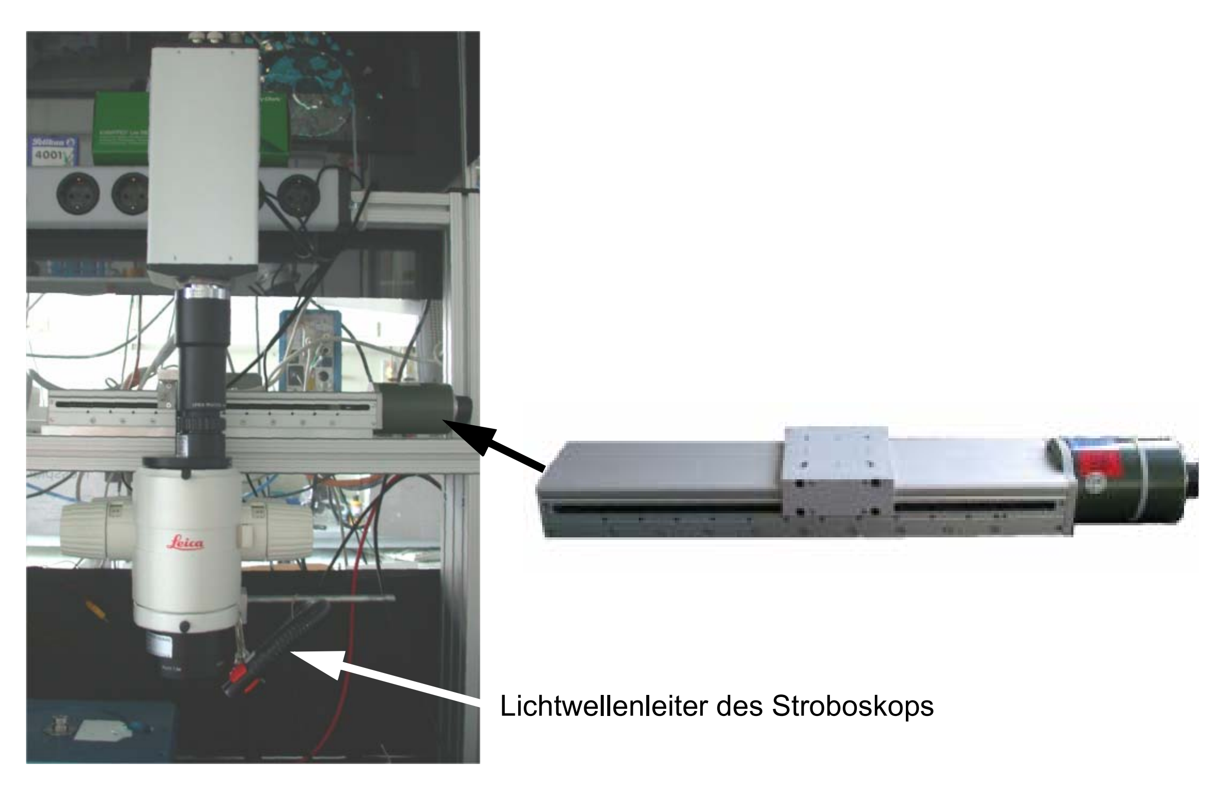


Abbildung 3.38: Links: In den Messplatz eingebauter Linearantrieb mit darauf montiertem Mikroskop und Kamera. Auch der Lichtwellenleiter des Stroboskops wird mitverfahren.
Rechts: Vergrößerte Darstellung des Linearantriebs

Die Kommunikation mit diesem Controller wurde in Testpoint realisiert, was in Kapitel 4 näher beschrieben wird.

3.4.1 Evaluierung des Linearantriebs

Wichtige Punkte bei der Evaluierung des Linearantriebes sind die Positioniergenauigkeit, die Rückkehrgenauigkeit und die kleinstmöglichen, reproduzierbaren Schritte.

Positioniergenauigkeit

Hier wurden dem Linearantrieb über die Testpoint-Steuerung (vgl. Abb. 4.1) verschiedene Fahrstrecken vorgegeben und mit einem Millimetermassstab, der in Abb. 3.39 zu sehen ist, überprüft.

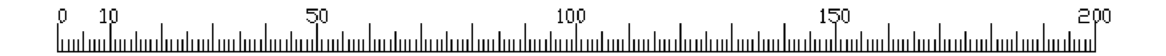


Abbildung 3.39: Verwendeter Millimetermassstab, der auf die Deckelplatte des Players geklebt, über die CCD-Kamera durch das Stereomikroskop aufgenommen wurde und als Referenz diente

Es wurden die Positionen 10, 50, 100 und 200 mm vorgegeben und mit der auf dem Linearantrieb montierten Kamera jeweils ein Bild der aktuellen Kameraposition über dem Millimetermassstab aufgenommen. Die Positionen wurden auch bei mehrmaligem Anfahren erreicht. Es tritt eine minimale Verschiebung auf, die jedoch in diesem Massstab nicht zu erkennen ist, und die im folgendem Teilkapitel Rückkehrgenauigkeit genauer betrachtet wird.

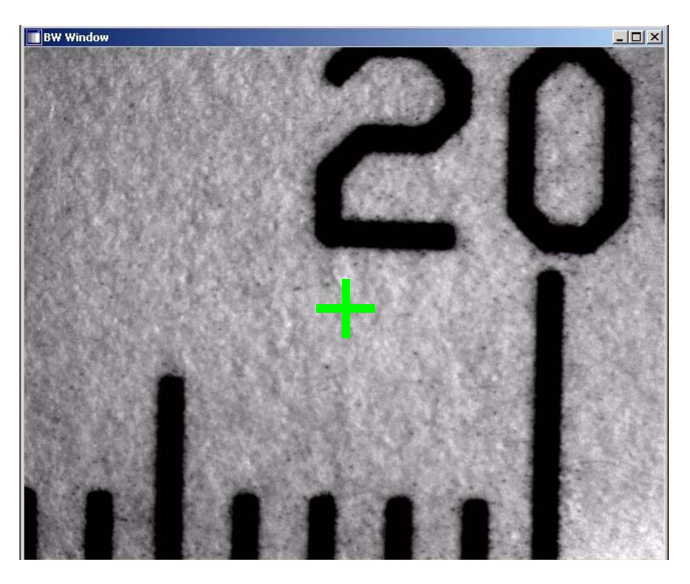


Abbildung 3.40: Screenshot der Kamera-Software-Oberfläche (CamWare) während der Bildaufnahme des Millimetermassstabes bei der Position 200 mm. Das Markerkreuzchen (zur besseren Sichtbarkeit zusätzlich hervorgehoben) stellt den Mittelpunkt des Bildausschnittes dar.

Abbildung 3.40 zeigt einen Screenshot des Bildverarbeitungs-PCs bei der Position 200 mm. Der Abstand von Strich zu Strich beträgt in der Realität 1 mm. Bei dieser Aufnahme mit einer 1,008-fachen optischen Vergrößerung wurde für 5 mm mit Hilfe von Corel Photo-Paint eine Länge von 376 Pixel ermittelt, wodurch 1 Pixel einer Strecke von 13.3 µm entspricht. Vermisst man einen größeren Bereich, so wird der Ablesefehler minimiert.

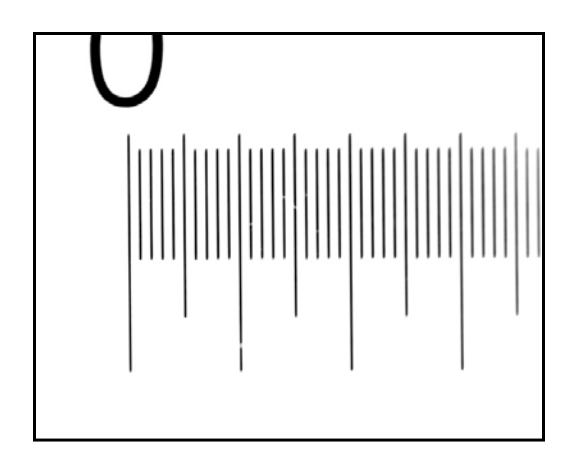
Das Markerkreuzchen, welches den Bildmittelpunkt darstellt, liegt um 206 Pixel, bzw. 2,739 mm neben der Sollposition, der Mitte des Striches bei 200 mm. Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von 1,37 %, was aufgrund der großen Fahrstrecke einen repräsentativen Wert darstellt. Bei 10 mm wurde die größte, bei 50 mm die kleinste Abweichung festgestellt, sie liegt somit im Bereich zwischen $\frac{0,622\ mm}{50\ mm} = 1,24$ % und $\frac{0,643\ mm}{10\ mm} = 6,43\ \%$.

Abbildung 3.41: Abweichung des Linearantriebs von der vorgegebenen Sollposition

Rückkehrgenauigkeit

Unabhängig von einer genauen Positionierung soll evaluiert werden, ob der Linearantrieb immer wieder am selben Ort landet, wenn man die selbe Vorgabe macht.

Hierfür wurde zehn mal zwischen der Position 10 mm und 100 mm hin- und hergefahren und mit der Kamera jeweils ein Bild eines Messobjektträgers, der bei 10 mm plaziert war, aufgenommen (vgl. Abb. 3.42).



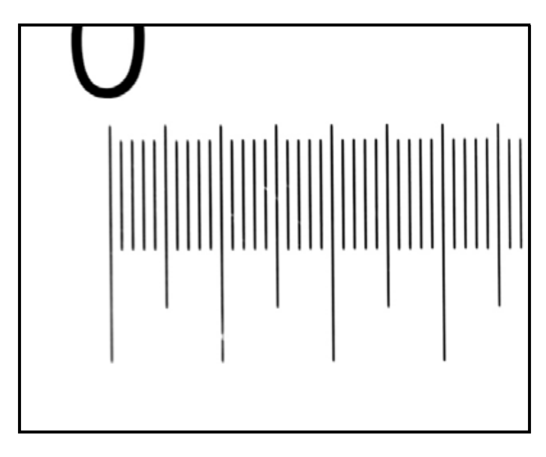


*Abbildung 3.42: links: Bild des Messobjektträgers vor dem Verfahren,
rechts: Bild des Messobjektträgers nach zehnmaligem Verfahren,
jeweils bei 18,9-facher optischer Vergrößerung. Der Bildausschnitt hat sich um 1,44 µm verschoben.*

Der Strichabstand des Messobjektträgers beträgt 10 µm, 100 µm entsprechen in beiden Bildern 278 Pixel, somit kommt 1 Pixel einer Strecke von 0,36 µm gleich.

Im linken Bild der Abb. 3.42 hat der am weitesten rechts liegende Strich einen Abstand

von 21 Pixeln, bzw. 7,55 µm zum Bildrand. Nach dem zehnmaligem Verfahren (rechtes Bild) hat dieser Strich einen Abstand von 25 Pixeln - der Bildausschnitt hat sich somit um 4 Pixel = 1,44 µm verschoben. Diese Verschiebung um 4 Pixel wurde auch mehrfach an anderen Strich-Mustern dieser Bilder überprüft, was folgende Grafik 3.43 verdeutlicht.

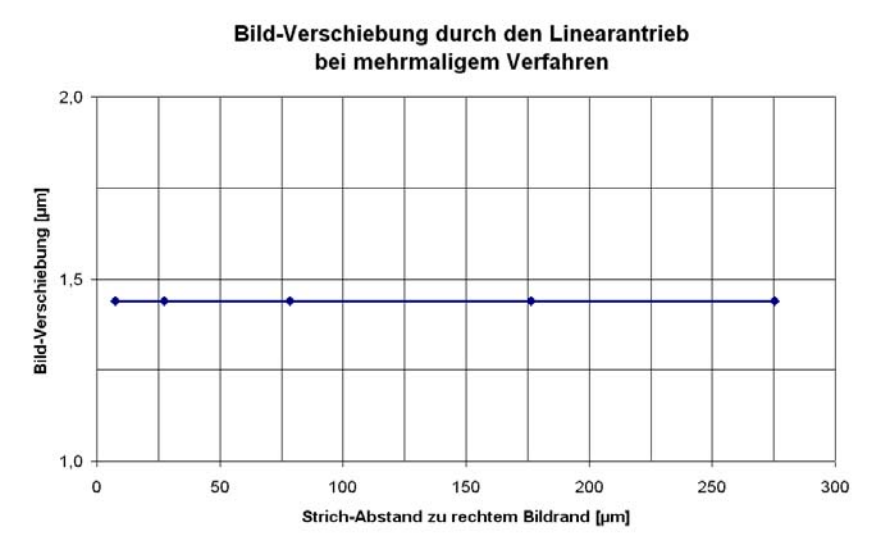


Abbildung 3.43: Verschiebung des Messobjektträger-Bildes nach zehnmaligem Verfahren. Die Bildausschnitte unterscheiden sich von der Sollposition typischerweise nur um wenige µm.

Kleinstmögliche, reproduzierbare Schritte

Hierbei geht es darum, herauszufinden, was die kleinstmögliche Eingabe in TestPoint darstellt, bei welcher der Linearantrieb noch reproduzierbar verfährt. Ist der eingegebene Wert zu klein, so verfährt der Linearantrieb überhaupt nicht. Ab einem bestimmten Wert ist dies zwar der Fall, aber der tatsächlich gefahrene Weg entspricht nicht der Vorgabe. Unter reproduzierbar ist hier also derjenige Vorgabewert zu verstehen, ab dem der Linearantrieb so verfährt, daß die tatsächliche Fahrstrecke dieser Vorgabe entspricht.

Die Eingabe in das Feld „direct input“ (vgl. Abb. 4.1) hat in Millimeter zu erfolgen. Bis zu der Eingabe von 0.4 bleibt der Linearantrieb von dieser Vorgabe völlig unberührt. Gibt man den Wert von 0.4 ein, so fährt der Linearantrieb ca. 30 µm, was bei weitem nicht der Vorgabe von 400 µm entspricht. Erst ab einem Wert von 1 mm erreicht man auch eine tatsächliche Verfahrung von 1 mm, bis auf den Fehler von 1,37 %, wie oben erwähnt. Beobachtet wurde dies ebenfalls mit der CCD-Kamera, die durch das Mikroskop auf den Messobjektträger fokussiert war, und durch den Linearantrieb verfahren wurde. Da beim derzeitigen Aufbau der kleinste Bildausschnitt bei der höchsten Vergrößerung 1,4 x 1,7 mm beträgt, ist eine Auflösung von 1 mm ausreichend. Außerdem kann die Position des Bildausschnitts kontinuierlich verändert und am Bildschirm mitverfolgt werden, so daß auch geringere Verfahrungen möglich sind.

Verfahrgeschwindigkeit

Für die Verfahrgeschwindigkeit lassen sich in der Testpointsteuerung mIt dem Schieberegler „velocity“ (vgl. Abb. 4.1) Zahlenwerte in einem Bereich von 0...50.000 eingeben.

Die Steuerung unterteilt die gesamte Fahrstrecke des Linearantriebs von 240 mm in 95.000 Inkremente. Wenn s den zurückzulegenden Weg bezeichnet, so muss der Steuerung der Wert $\frac{s}{240} \times 95.000$ übergeben werden. Die Vorgabe der Geschwindigkeit setzt sich nun aus diesen Inkrementen, der Drehfrequenz der Schneckenwelle in Hz, sowie weiterer Parameter dieser Schnecke zusammen. Der genaue Zusammenhang ist [13] zu entnehmen.

Da sich der einzugebende Wert für die Geschwindigkeit also aus mehreren Parametern zusammensetzt, ist es sinnvoll, die tatsächliche Relation zu überprüfen. Mit einer Stoppuhr wurde daher die Zeit bestimmt, in der der Linearantrieb die maximal zur Verfügung stehende Strecke von 240 mm zurücklegt. Tabelle 3.5 und Abb. 3.44 zeigen die daraus ermittelten Geschwindigkeiten. Der Controller SM300 akzeptiert auch Werte über 50.000, welche die Verfahrgeschwindigkeit allerdings nicht mehr steigern.

Wert	Zeit [s]	Geschwindigkeit [mm/s]
1.000	100	2,4
10.000	10	24
20.000	5	48
50.000	2	120

Tabelle 3.5: Geschwindigkeiten des Linearantriebs: Zusammenhang zwischen der tatsächlichen Geschwindigkeit und des in der TestPoint-Steuerung vorgegebenen Wertes

Beim Start der Messplatz-Software wird der „velocity“-Wert auf 3.000 gesetzt, wodurch sich der verändernde Bildausschnitt beim Verfahren der Kamera auf dem Bildverarbeitungs-PC noch gut mitverfolgen lässt.

Geschwindigkeit des Linearantriebs

v [mm/s]

Vorgabe-Wert [-]

Abbildung 3.44: Geschwindigkeiten des Linearantriebs: Tatsächliche Geschwindigkeit bei vorgegebenen Werten der TestPoint-Steuerung.

3.5 Messdatenerfassungskarte ADwin-light-16

3.5.1 Anforderungen

Da die Ansteuerung des Messplatzes v.a. aus Dokumentationsgründen einfach über einen PC erfolgen soll, ist es erforderlich, die Frequenzinformation des CD-Antriebs in den PC einzulesen. Dort wird sie dann entsprechend weiterverarbeitet und abhängig von verschiedenen Benutzereingaben wird schliesslich das Ausgangssignal gesetzt, welches zur Steuerung von Stroboskop und Kamera dient.

Bisher wurden am Lehrstuhl für Anwendungsentwicklung für solche Aufgaben die Messkarten KPCI 3104 von Keithley eingesetzt. Dementsprechend sollte eine solche Karte auch für diese Anwendung verwendet werden. Dabei wurde festgestellt, daß die Flanke des Nulldurchgangssignals des CD-Players nicht reproduzierbar erkannt werden konnte, bzw. der ausgegebene Triggerimpuls (für Kamera und Stroboskop) nicht zeitkonstant zum eingelesenen Signal war. Auch eine sehr stabile, durch einen Funktionsgenerator generierte Rechteckspannung konnte nicht mit ausreichender Genauigkeit erfasst werden.

Dies liegt daran, daß diese Karten vollständig von dem jeweiligen Messdatenerfassungs-Programm, wie z.B. TestPoint, angesteuert werden und ohne diese Ansteuerung nicht in der Lage sind, über einen längeren Zeitraum Messwerte selbständig aufzunehmen und weiterzuverarbeiten, wobei dies stark von der Kombination aus Hardware, Betriebssystem und TestPoint abhängt. Im vorliegenden Fall muss zum einen das Frequenzsignal des Players aufgenommen und abhängig davon auf einem anderen Kanal ein Signal ausgegeben werden. Diese Aufgaben müssen der Karte durch TestPoint übergeben werden. Sowohl die Analog/Digital- und Digital/Analog-Wandlung am Eingang bzw. Ausgang, als auch der

Ablauf des TestPoint-Programms nimmt eine gewisse Zeit in Anspruch. Vor allem aber ist die Laufzeit des Windows-basierten TestPoint-Programms nicht konstant und damit wird zwischen Ausgangs- und Eingangssignal keine konstante Zeitdifferenz erreicht.

Bei der vorliegenden Anwendung ist es aber erforderlich das Frequenzsignal des CD-Players kontinuierlich und mit höchster Genauigkeit auszulesen. Deshalb ist es hier notwendig, eine Messkarte einzusetzten, die diese Aufgaben eigenständig und unabhängig von sämtlichen Hintergrund-Aktivitäten des PCs durchführt. Es musste also nach einer Alternative recherchiert werden. Die Entscheidung fiel auf die PCI-MessKarte ADwin-light-16 der Firma Jäger Computergesteuerte Messtechnik GmbH [18], [19], [20], [21], [22]. Sie verfügt über einen eigenen Signalprozessor (40 MHz), sowie internen Speicher (256 kB) und wird so der Anforderung gerecht, selbständig Aufgaben ausführen zu können.

Technische Daten ADwin-light-16

- Prozessor-Taktfrequenz 40 MHz (25 ns-Steps)
- interner Speicher, Programme 128 kB
- interner Speicher, Daten 128 kB
- Registerbreite 32 bit
- Eingänge 6 digital, 8 analog, 1 Event (Trigger)
- Ausgänge 6 digital, 2 analog
- A/D-Konvertierungszeit: 10 µs

Die Karte muss zunächst mit der zugehörigen Programmiersprache ADBasic programmiert werden. Dieses Programm läuft dann selbständig und unabhängig vom Betriebssystem im Hintergrund ab. Selbstverständlich können aber dem ADBasic-Programm verschiedene Parameter durch TestPoint übergeben werden.

3.5.2 Programmierung der Messkarte mit ADbasic

Da die ADwin ebenfalls ein sehr wichtiger Teil des Messplatzes darstellt, wird an dieser Stelle näher auf den Programmcode eingegangen, der mit der Software ADbasic, Version 3.20 der Firma Jäger Computergesteuerte Messtechnik GmbH erstellt wurde. Das vollständige Programm ist im Anhang A.3 vorzufinden. Dort werden die einzelnen Programmzeilen jeweils nach den ’-Zeichen im Programmcode selbst kommentiert. An dieser Stelle soll nur das Wichtigste kurz zusammengefaßt werden.

Zuerst muß das Eingangssignal erfasst werden. Hierfür wird dies auf den analogen Eingangskanal 1 gelegt. Die Karte tastet diesen Eingang nun bei jedem Programmdurchlauf ab und ermittelt dessen Wert. Um hieraus die Frequenz zu ermitteln wird der Indikator „FlagObUnt“ benötigt, der erkennt, ob das Signal high oder low entspricht.

In dem Moment des Erkennens der Flanke, wird die aktuelle Zeit des Prozessortimers in „RTNew“ abgelegt, und für die nächste Flanke als „RTOld“ gespeichert. Die Differenz „RTNew-RTOld“ dieser beiden Zeiten stellt die Periodendauer dar, aus deren Kehrwert die Frequenz ermittelt werden kann. Die Zeiten werden dabei in Prozessorschritten zu 25 ns ermittelt. Um die Zeiten oder Frequenzen in SI-Einheiten darzustellen muß folglich der Umrechnungsfaktor 40.000.000 mit einbezogen werden.

Die Laufzeit des Programmes beträgt 12,5 µs (500 Prozessorschritte), die durch die Variable „Globaldelay“ festgelegt werden kann. Hierbei wurde der kleinstmögliche Wert empirisch ermittelt - bei 12,5 µs beträgt die Prozessorauslastung zwischen 90 und 98 %. Die Laufzeit wird im wesentlichen durch die in den technischen Daten angegebene A/D-Konvertierungszeit von 10 µs bestimmt.

In der Variable „Frequenzteiler“ wird abhängig von der Eingangsfrequenz des Player-Signals der Teiler bestimmt, durch den dieses Signal geteilt werden muß, damit das Ausgangssignal kleiner 8 Hz ist. Mit der Variable „Teilerzähler“ werden nun die Impulse des Eingangssignals bis zu dem in „Frequenzteiler“ gespeicherten Wert gezählt, und sobald diese Zahl erreicht ist, wird die Variable „Strobotimer“ auf die aktuelle Zeit des Prozessortimers und „Frequenzteiler“ auf null gesetzt. So wird der Zeitpunkt der letzten 0°-Marke, bezüglich der die Kamera und das Stroboskop angesteuert werden müssen, festgehalten. Diese Frequenzteilung ist in Abb. 3.45 zu sehen.

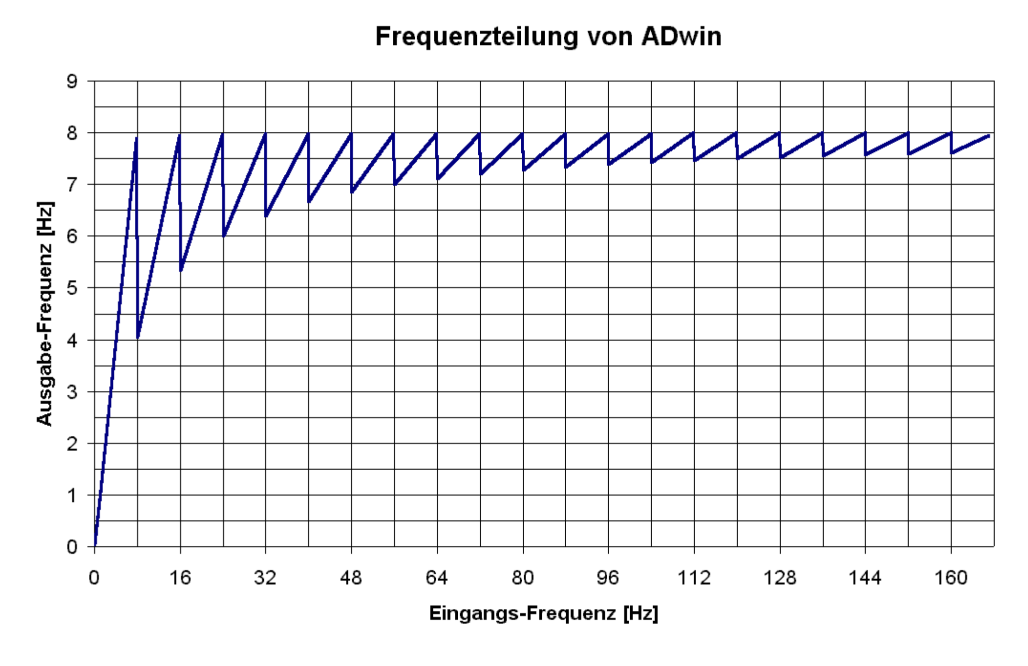


Abbildung 3.45: Dargestellt ist die Frequenzteilung des Eingangs-Signals (Nulldurchgang CD-Player), welche die ADwin-Karte zur Berechnung der Frequenz des Ausgangsignals zur Ansteuerung von Stroboskop und CCD-Kamera vornimmt. Zwischen Ausgangs- und Eingangsfrequenz besteht stets ein linearer Zusammenhang, da der Ausgangspuls zeitsynchron zum Eingangspuls gesetzt werden muß.

Bei jedem Programmdurchlauf wird die Variable „NowDelta“ berechnet, welche die verstrichene Zeit, seit dem „Strobotimer“ gesetzt wurde, beinhaltet. Ist diese Zeit nun größer als „Strobodelay“ und „Winkeldelay“, so ist die Startbedingung für den Ausgangstrigger gegeben und die Karte gibt eine Spannung von 5 V auf dem Ausgang 1 aus.

„Strobodelay“ symbolisiert die Wartezeit t = 1/2 T - 12,8 µs, nach der das Stroboskop angesteuert werden muß, um zum Zeitpunkt t = 1/2 T die maximale Intensität erreicht zu haben, wie dies in Kap. 2.2 vorgestellt wurde. Durch die Variable „Winkeldelay“ kann eine zusätzliche Wartezeit eingestellt werden, welche die Signale um diese Wartezeit verschiebt, was auf der CD zu einer Bildaufnahme bei einem anderen Winkel führt. Der Wert von „Winkeldelay“ wird abhängig von dem in der TestPoint-Steuerung durch den Benutzer angegebenen Winkel und der aktuellen Drehfrequenz berechnet. Wird nun „NowDelta“ größer als die Summe aus „Strobodelay“ + „Winkeldelay“ + „Strobotrigger“, so wird der Ausgangstrigger wieder auf 0 V gesetzt. In „Strobotrigger“ ist lediglich die Zeitdauer des Ausgangstriggersignals von 0,5 ms definiert.

Sowohl das Stroboskop als auch die Frame-Grabber-Karte der CCD-Kamera werden durch das Ausgangssignal der ADwin-Karte angesteuert. Das Stroboskop erkennt die Flanke des Triggersignals und gibt unmittelbar einen Lichtblitz mit dem bekannten Intensitäts-Zeitverlauf aus. Die eigentliche Bildaufnahme kann durch die Vorgabe eines delays in der Kamera-Software in einem großen Bereich nach der ansteigenden Flanke des Triggersignals ausgelöst werden. In diesem Fall wurde hier der Wert 12,8 µs eingestellt. Dementsprechend wird das Bild direkt bei 1/2 T, bzw. 180° aufgenommen. Dies gilt für jede Drehfrequenz des CD-Players, da ausgehend von dem frequenzabhängigen Offset von 1/2 T jedesmal dieses konstante Delay subtrahiert wird, und durch die Frame-Grabber-Karte wieder konstant hinzu addiert wird.

Die ADwin-Karte gibt also zu folgendem Zeitpunkt das Triggersignal aus:

$$t_{Strobo} = \frac{1}{2}T - 12,8\ \mu s$$

Für die CCD-Kamera bedeutet dies die Bildaufnahme zum Zeitpunkt:

$$t_{CCD} = \frac{1}{2}T - 12,8\ \mu s + 12,8\ \mu s = \frac{1}{2}T$$

Durch diese Ansteuerung wurden sowohl helle, als auch nicht driftende BIlder realisiert.

Bei jedem Setzen des Ausgangssignals auf 5 V wird der „IndexCounter“ um 1 inkrementiert. Dieser Zähler ist in der TestPoint-Steuerung als „image counter“ wiederzufinden. So wird eine Zahlenreihe generiert, die jedem aufgenommenen Bild genau eine Zahl zuordnet, denn auch die Bildaufnahme wird durch genau diesen Ausgangstrigger ausgelöst. Die

Kamera-Software fügt ebenfalls jedem aufgenommenen Bild automatisch eine Numerierung zu.

Im übrigen werden bei jedem Setzen des Ausgangstriggers die aktuellen Parameter, wie Zeit und Frequenz, übergeben. Da der Ausgangstrigger aber 500 µs lang gesetzt bleiben soll, würden bei einer Programmlaufzeit von 12,5 µs 40 mal identische Werte für die Frequenz übergeben werden. Außerdem wird während der gesamten Zeit, in der der Ausgangstrigger 5 V beträgt, nur einmal ein BIld aufgenommen, nämlich in dem Moment der aufsteigenden Flanke. D.h., dass nur die Zeit, bei der das Triggersignal auf 5 V springt die richtige Zeitinformation für das aufgenommen Bild repräsentiert.

Aus diesem Grund überprüft die Variable „DataSetWritten“, ob die Übergabe der Parameter an TestPoint bereits erfolgt ist. Somit werden die Werte also nur einmal, und zwar in dem Moment des Setzens des Ausgangstriggers auf 5 V, übergeben.

Die ADwin-Karte verfügt über einen 32-bit-Timer. Dies ist zwar ein guter Wert, aber bei Prozessorschritten von 25 ns läuft dieser Timer bereits nach 53,7 Sekunden (2^{31} Prozessorschritte nach dem Starten) über und springt auf den negativen Wert von -2^{31} Prozessorschritten. Nun zählt der Timer ausgehend von diesem negativen Wert hoch und springt demzufolge ab jetzt alle 107,4 Sekunden (2^{32} Prozessorschritte) erneut auf den Wert von -2^{31}. Deswegen wird durch die Variable „FlagLastSignum“ das Vorzeichen des Timers überprüft und bei jedem Springen von $+2^{31}$ auf -2^{31} wird die Variable „ZaehlerMultiply“ um eins erhöht. Hiermit lassen sich dann in TestPoint die korrekten Zeiten berechnen.

Für den Setup-Modus, der es dem Anwender erlaubt, das Experiment vorzubereiten, und die Kamera zu fokussieren, wurde der „continuous flash mode“ eingefügt. Falls der Parameter „PAR_6“ durch das Feld „flash mode“ in der TestPoint-Steuerung (vgl. Abb. 4.1) auf 1 gesetzt wird, so wird diese Schleife durchlaufen, ansonsten das normale, soeben beschriebene Programm. Diese Schleife gibt ein 5 V Rechtecksignal mit der Frequenz 4 Hz aus. 4 Hz wurde als sinnvoll erachtet, da hierbei eine ausreichend schnelle Bildaktualisierung erreicht wird und gleichzeitig der Arbeitsspeicher des Bildverarbeitungs-PC für eine Bildsequenz von 90 Sekunden Dauer ausreicht. Bei niedrigeren Frequenzen wirken sich Veränderungen z.B. des Fokus erst viel später aus, was das genaue Einstellen erschwert - bei höheren Frequenzen ist der Arbeitsspeicher früher belegt, und die Bildaufnahme muss ständig neu gestartet werden.

3.5.3 Ausblick

Wie aus den technischen Daten zu entnehmen ist, besitzt die Karte auch einen separaten Trigger-Eingang, auch Event-Eingang genannt. In diesem Fall würde die A/D-Konvertierungszeit wegfallen, die Erkennung eines TTL-kompatiblen Triggers geschieht in einem wesentlich kürzeren Zeitintervall. Die Karte würde beim Auftauchen eine Signals an diesem Eingang sofort das hinterlegte Programm ausführen, bzw. an die Stelle „EVENT:“

im ADbasic-Programm springen. Die Programmierung hierfür ist aber wesentlich aufwendiger.

Einerseits muß sichergestellt sein, dass das Programm innerhalb zwei aufeinanderfolgender Pulse vollständig ausgeführt werden kann. Dies ist hier gegeben, da die Laufzeit im Event-gesteuerten Modus auf jeden Fall kürzer ist als im verwendeten Timer-gesteuerten Modus, wo sie mit 12,5 µs auch deutlich kleiner ist als die kürzeste Periodendauer bei der höchsten Eingangsfrequenz von 167 Hz (10.000 U/min) des Players.

3.6 Optische Beleuchtung

3.6.1 Modifikation des Strahlenganges beim Leica-Auflichtgehäuse

Bisher erfolgt die Beleuchtung meist direkt durch den Lichtwellenleiter des Stroboskops, der ebenfalls mit dem MIkroskop und der Kamera mitverfahren wird. Der Bildkontrast ist ideal für Winkel zwischen 30 und 35°, wie in Abb. 3.46 ersichtlich.

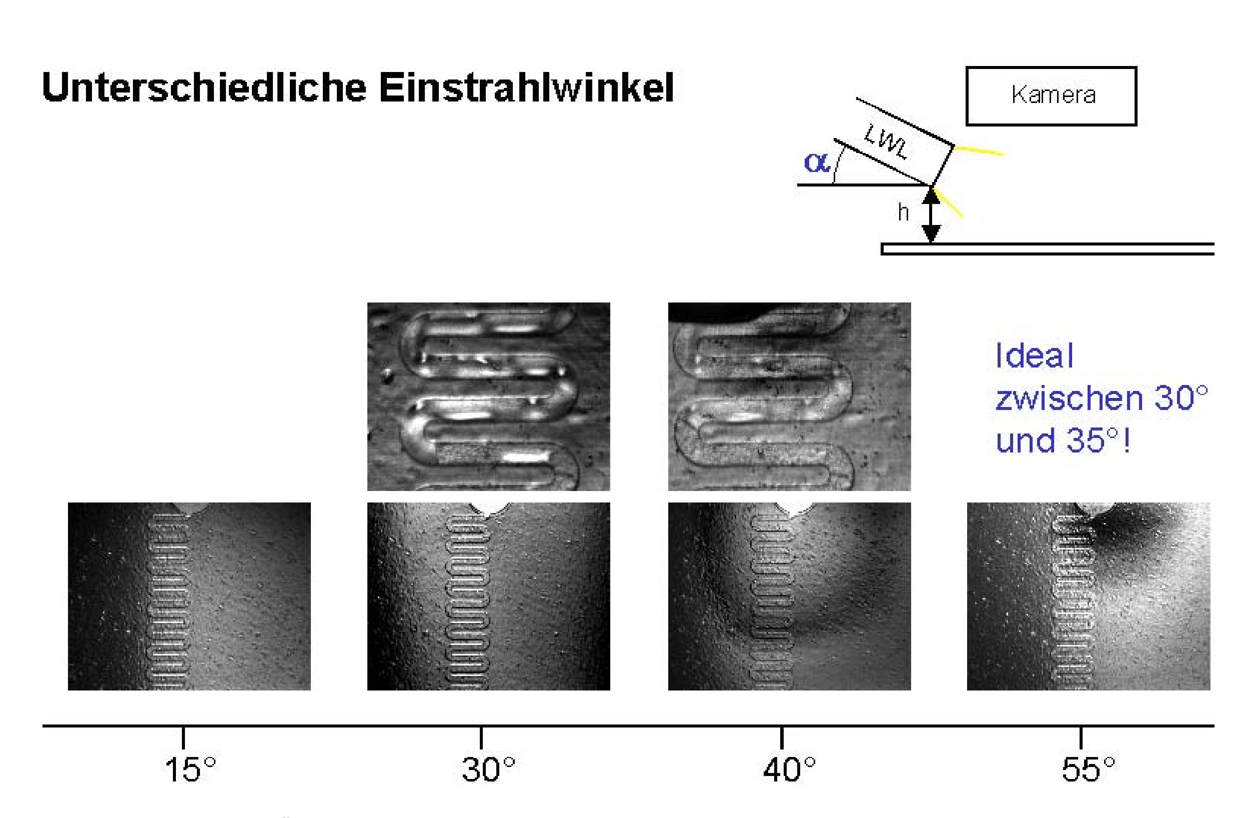


Abbildung 3.46: Die Übersicht stellt den Einfluß der unterschiedlichen Einstrahlwinkel auf den BIldkontrast dar. Die besten Resultate werden bei einem Winkel zwischen 30 und 35! zur Oberfläche erreicht.

Alternativ kann auch voon oben mit dem Leica-Auflichtgehäuse beleuchtet werden, welches die Ankopplung eines Lichtwellenleiters an das Mikroskop ermöglicht. Diese wurde für den Messplatz, wie in Abb. 3.47 angegeben, modifiziert. Zwei der teildurchlässigen Spiegel

wurden entfernt, der dritte wurde durch einen Spiegel mit einer Reflektivität von größer 90 % ersetzt. Man erhält dadurch eine Intensitätssteigerung von 20 %.

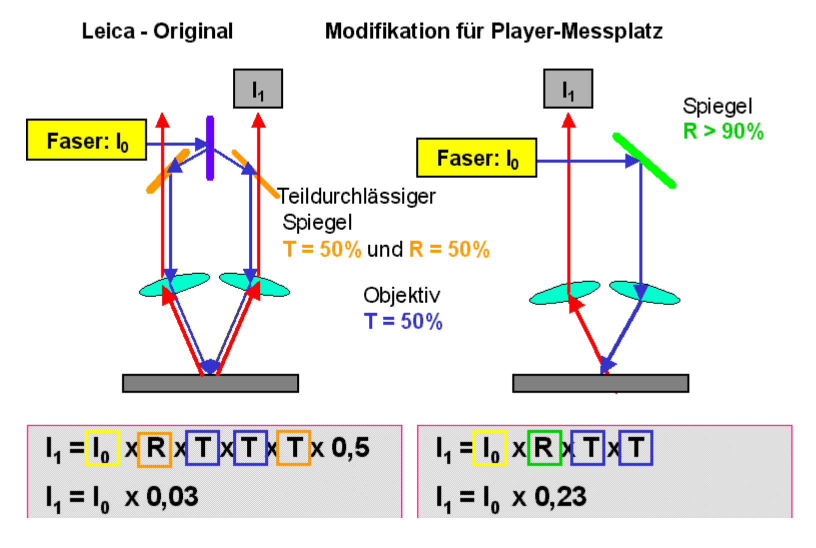


Abbildung 3.47: Modifikation des Strahlenganges beim Leica-Auflichtgehäuse, Intensitätssteigerung um 20 %.

4 Gesamtsystem

4.1 Ansteuerung des Messplatzes über TestPoint

Da mehrere Personen Zugang zu dem Messplatz haben sollen, ist eine benutzerfreundliche Bedienoberfläche unabdingbar. Zur Programmierung wurde das Softwarewerkzeug TestPoint der Firma Keithley Instruments GmbH in der Version 4.1 eingesetzt, Abbildung 4.1 zeigt die damit entwickelte Softwareoberfläche für den Bio-Disk-Messplatz.

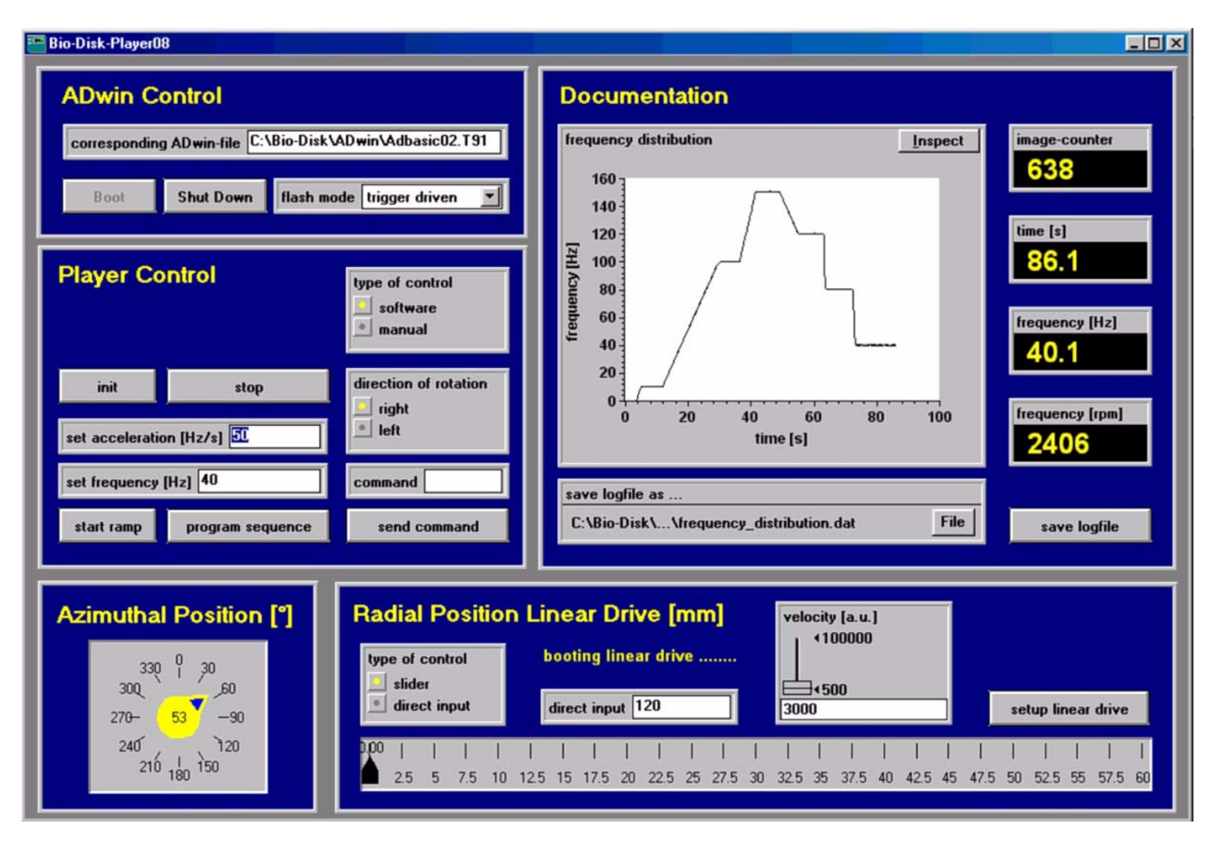


Abbildung 4.1: TestPoint-Oberfläche des Steuerungs-PCs zur Ansteuerung des Messplatzes. Der CD-Player kann mit verschiedenen Beschleunigungsrampen auf die gewünschte Drehfrequenz geregelt werden. Mit „Azimuthal“ und „Radial Position“ kann jeder Bereich der CD mit der CCD-Kamera angefahren und beobachtet werden. Zudem werden dem Anwender im „Documentation“-Feld die tatsächlichen Werte der Drehfrequenz, sowie der Frequenzverlauf über der Zeit seit Beginn des Experiments visualisiert.

4.1.1 Was ist TestPoint?

Mit dem Software-Tool TestPoint lassen sich verschiedenste Anwendungen zur Messdaten-Erfassung und -Verarbeitung erstellen.TestPoint ist in der Lage unterschiedliche Hardware oder Schnittstellen direkt anzusteuern. Die zu entwickelnde Anwendung wird in einer grafischen Oberfläche entwickelt, welche auch gleich die spätere Benutzeroberfläche darstellt. Hinter jedem Objekt befinden sich die in Abb. 4.2 gezeigten Felder.

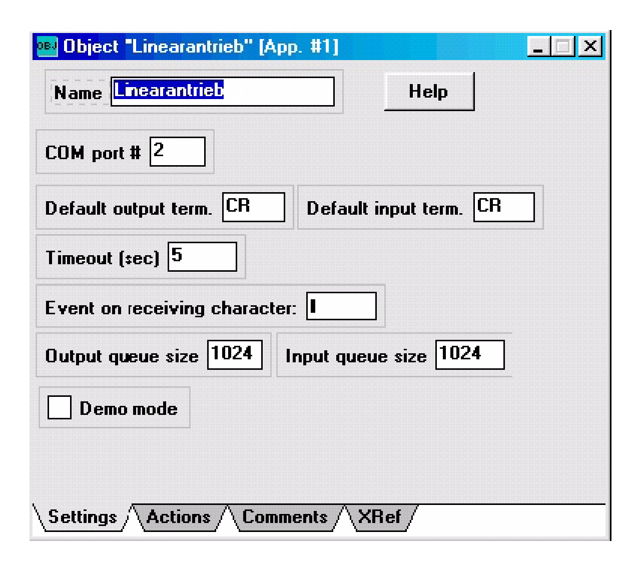


Abbildung 4.2: Das Bild zeigt am Beispiel des COM-Objektes für seriellen Schnittstellen die zur Verfügung stehenden Reiter der TestPoint-Objekte

Das Hauptfenster „Settings“ zeigt auf einen Blick alle Parameter und Einstellungen, die für dieses Objekt vorgenommen werden können. In dem Fenster „Actions“ können Aktionen - sogenannte Action Lines - hinzugefügt werden, die abgearbeitet werden sobald das entsprechende Objekt geklickt oder gesetzt wird (Übergabe von Werten durch andere Objekte oder Ereignisse). Durch Klicken des Reiters „Comments“ öffnet sich ein Editor-Fenster, in das Kommentare geschrieben werden können, die z.B. den Programmablauf der Action Lines diese Objektes beschreiben. Allerdings gibt es in TestPoint keine Möglichkeit, die „Comments“ aller Objekte zusammenhängend und in einer übersichtlichen, strukturierten Form auszudrucken, wodurch der Eintrag von wichtigen Kommentaren an dieser Stelle vermieden werden sollte. Im letzen Fenster „XRef“ kann man sich anzeigen lassen, mit welchen anderen Objektien dieses Objekt veknüpft ist.

Per „drag and drop“ können nun sämtliche Programmierungen vorgenommen werden, in dem bestimmte Objekte mit der Maus in den Reiter „Actions“ gezogen werden. TestPoint schlägt automatisch alle Funktionen, die damti möglich sind, vor.

4.1.2 Beschreibung der erstellten Software-Oberfläche

Der Bereich links oben „ADwin Control“ (vgl. Abb. 4.1) dient zum Starten und Beenden der ADwin-Messkarte. Im Feld „corresponding ADwin file“ können verschiedene Programme geladen werden, die die ADwin im Hintergrund ausführt. Die erstellten Programme sind im Anhang A.3 zu finden; deren Funktion wird in Kapitel 3.5 beschrieben. Im Normalbetrieb wird das Stroboskop und die CCD-Kamera durch den „flash mode“ „trigger driven“ gesteuert. Zum Einrichten des Messplatzes und zur Experiment-Vorbereitung steht die Funktion „permanent 4 Hz“ zur Verfügung, womit Kamera und Stroboskop ohne Triggersignal des Players mit 4 Hz betrieben werden.

Der Bereich „Player Control“ dient zur Ansteuerung des CD-Players. Aufgrund der Sicherheitsschalter, welche die Stromzufuhr des CD-Players beim Öffnen der Türen der Sicherheitsbox unterbrechen, muss der Motion Controller des CD-Players nach erneutem Einschalten zuerst initialisiert werden (Schalftläche „init“). In dem Feld „type of control“ kann festgelegt werden, ob der Player durch diese TestPoint-Oberfläche („software“) oder durch den an der Frontseite des Players angebrachten Handregler gesteuert werden soll („manual“). Mit „direction of rotation“ kann die Drehrichtung eingeben werden („left“, „right“). Die Schaltfäche „start ramp“ übergibt dem Motion Controller die zu erreichende Drehzahl („set frequency“) in Hz und die Beschleunigung („set acceleration“) in Hz/s, bzw. U/s², die dieser dann selbständig regelt. Um den Player schnell zum Stillstand zu bringen steht die Schalfäche „stop“ zur Verfügung. Um auch noch andere als die derzeit gebrauchten Befehle an dem Motion Controller schicken zu können, ist das Feld „command“ vorhanden. Hier können sämtliche Steuerbefehle, die [10] zu entnehmen sind, eingetragen und mit der Schaltfläche „send command“ an den Motion Controller gesendet werden. Mit „programm sequence“ wird eine neue Oberfläche - ein neues Panel - geöffnet, welches in Abb. 4.4 zu sehen ist.

In dem Feld „Radial Position Linear Drive“ kann die Position der CCD-Kamera über dem CD-Player mit dem Linearantrieb in radialer Richtung varriert werden. Es stehen zwei Möglichkeiten der Positionsvorgabe zur Verfügung: „type of control“: „slider“, „direct input“. Damit der Benutzer während eines Experimentes schnell und unkompliziert in der Lage ist die betreffende Stelle auf der CD anzufahren, steht ein Schieberegler („slider“) zur Verfügung. Der Marker kann mit der Maus verschoben werden und dadurch kann der gesamte CD-Radius von 6 cm abgefahren werden. Die Stellung oder der Wert dieses Reglers wird permanent ausgelesen und sofort an die Steuerung des Linearantriebs weitergegeben. Durch die Wahl eines ausreichend hohen Geschwindkeitswertes in „velocity“ (dimensionsloser Wert) kann der Anwender mit dem Tempo der Mausbewegung die Geschwindigkeit des Linearantriebs regeln und demzufolge die Position und Geschwindigkeit dem Experiment, bzw. den aktuellen Bedingungen direkt anpassen. Wenn man die zu beobachtende Radialposition kennt, ist es manchmal sinnvoller, den Wert direkt per Tastatureingabe vorzugeben („direct input“).

Der Button „setup linear drive“ öffnet die Setup-Oberfläche des Linearantriebs, die in Abb. 4.3 zu sehen ist. Dort können über den Knopf „init“ zuerst die Schnittstellenparamter des Linearantrieb-Controllers (SM300) gesetzt werden. Falls der Linearantrieb während des Betriebs nicht mehr reagiert, so können mit „reset controller“ alle Parameter auf den entsprechenden Startwert zurückgesetzt werden, wodurch die Funktion meistens wieder hegestellt werden kann. Das Feld „controller message“ zeigt als zusätzliche Information die aktuellen Statusmeldungen der SM300 an. Bei jedem Neustart, bzw. nach jeder Initialisierung müssen die Nullpunkt- bzw. Endwert-Einstellungen neu kalibriert werden. Dies wird durch Klicken von „search reference“ ausgeführt. Wenn die Steuerung aktiviert ist, so entsteht ein sehr hochfrequenter Pfeifton, der von manchen Anwendern als störend empfunden wird. Deshalb wurde ein weiteres Auswahlfeld („remote control“ „enable“, disable“) eingeführt, mit dem die Steuerung deaktiviert werden kann, falls der Linearantrieb gerade nicht benötigt wird.

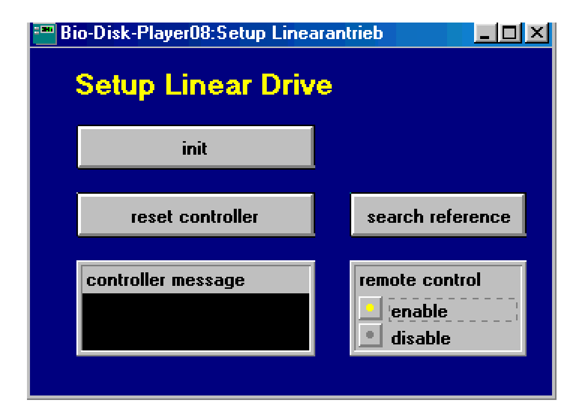


Abbildung 4.3: Setup-Oberfläche des Linearantriebs. Hier kann die Steuerung des Linearantriebs erneut initialisiert werden, bzw. können alle Befehle gelöscht werden

Die Schaltflächen „init“, „reset controller“ und „search reference“ werden beim Start der Messplatz-Software von TestPoint selbst in der richtigen Reihenfolge nacheinander gedrückt (also automatisch aktiviert) und die entsprechenden Aktionen ausgeführt.

Zurück zur Haupt-Oberfläche der TestPoint-Sleuerung (vgl. Abb. 4.1): Der Drehknopf „Azimuthal Position“ gibt die Möglichkeit, sich auf der CD in azimutaler Richtung, also auf einer Kreisbahn um den Mittelpunkt herum, zu bewegen. Demnach ist es möglich, die gesamte CD-Oberfläche während des Betriebs zu beobachten.

Die Grafik „frequency distribution“ des Abschnitts „Documentation“ visualisiert dem Anwender online den zeitlichen Verlauf der Frequenz, mit der sich die CD auf dem Player dreht. Dargestellt ist die aktuelle Drehfrequenz des Players über der Zeit seit Beginn der Messung. Um den Zahlenwert der Frequenz auch direkt ablesen zu können, wird dies rechts in der TestPoint-Oberfläche noch einmal separat in Hz und U/min („frequency [Hz]“, „frequency [rpm]“) angezeigt. Ebenfalls wird dort die Zeit („time“) seit dem Starten des Experiments, sowie die Bild-Nummer („image counter“) dargestellt. Diese Bild-Nummer ist

identisch mit den Bild-Nummern der durch den Bildverarbeitungs-PC aufgenommen Bilder. Jedes Mal, wenn durch die ADwin-Karte ein Ausgangs-Trigger-Impuls gesetzt wird, der die frame-grabber-Karte der CCD-Kamera im Bildverarbeitungs-PC und das Stroboskop ansteuert, wird dieser image counter um eins hochgesetzt.

Mit der Schaltfläche „save logfile“ kann der Frequenzverlauf auch als .txt.-Datei mit den unter „save logfile as ...“ angegebenen Einstellungen (Pfad und Dateiname) abgespeichert werden. Pro Ausgangstrigger, also bei jedem Bild, wird die Bild-Nummer, die aktuelle Frequenz in Hz und U/min, sowie die Zeit seit Beginn des Experiments in dem Logfile weggeschrieben. Diese Daten können anhand der Bild-Nummer jedem Bild zugeordnet werden und der Frequenzverlauf kann z.B. mit Microsoft Excel visualisiert werden.

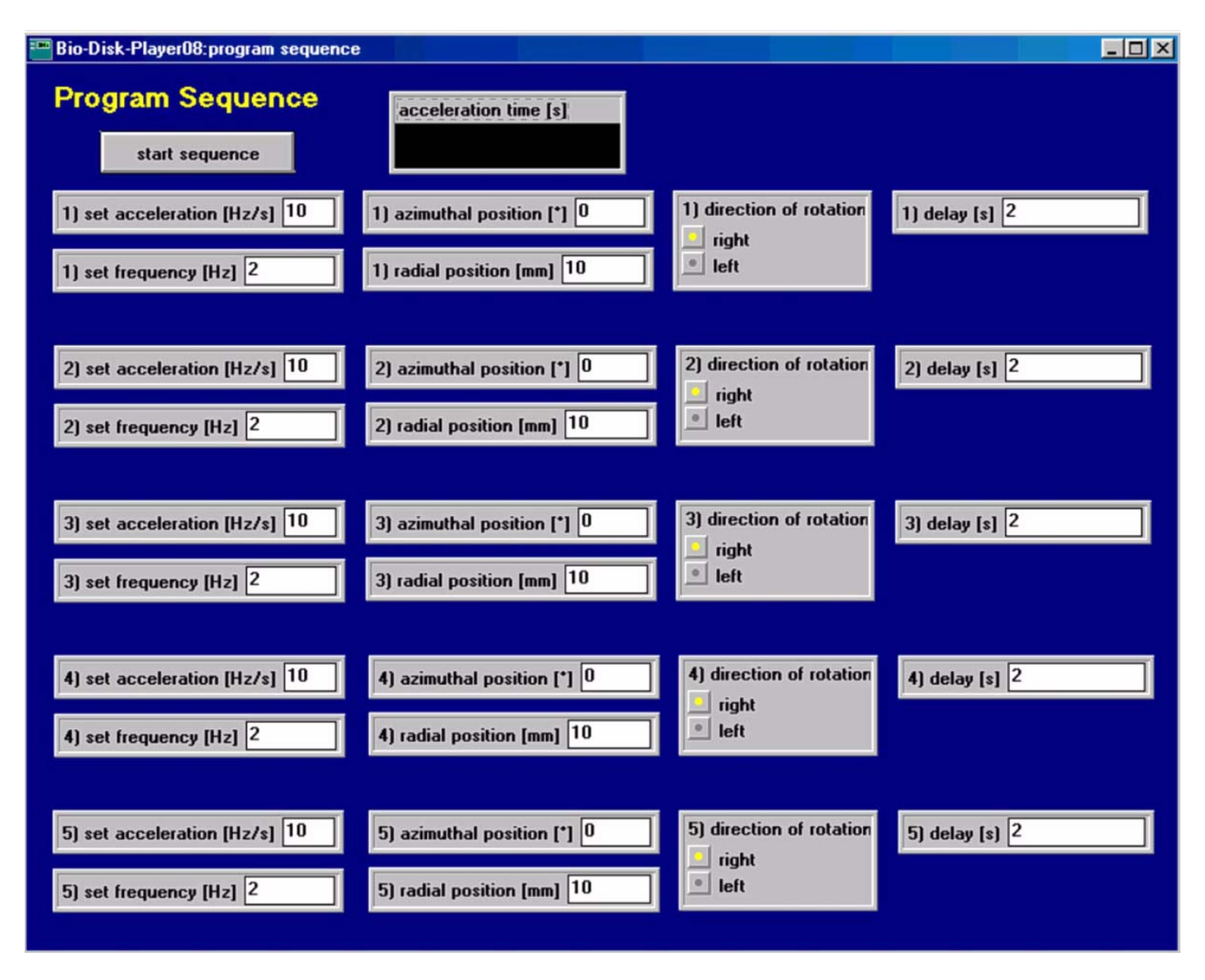


Abbildung 4.4: TestPoint-Fenster „Program Sequence“, mit dem ein Fahrprogramm erstellt werden kann

Über das Fenster „Programm Sequence“ (vgl. Abb. 4.4) steht dem Anwender die Option zur Verfügung, ein Fahrprogramm zu erstellen. Dort können in fünf Schritten die zu fahrenden Rampen, also Beschleunigung, Enddrehzahl und Drehrichtung, vorgegeben werden. Die Beobachtungsposition in radialer und azimutaler Richtung kann gleich zu Beginn auch jeweils festgelegt werden. Das Display „acceleration time“ zeigt pro Programmschritt jeweils

den berechneten Wert der Beschleunigungszeit an, also die Zeit, die mit der jeweiligen Beschleunigung zum Erreichen der jeweiigen Enddrehzahl benötigt wird. Ist diese Zeit verstrichen, so stoppt die TestPoint-Steuerung eine in „delay“ angegebene Zeit lang. Dies ist sinnvoll, um einen bestimmten Bereich auf der CD über einen längeren, eben diesen Zeitraum beobachten zu können.

Ausblick

Damit ein bereits durchgeführtes Experiment noch einmal mit den selben Einstellungen wiederholt werden kann, ist es sinnvoll, die in „Program Sequence“ eingegebenen Parameter abzuspeichern. Hierfür kann man eine weitere Schaltfläche einfügen, die diese Parameter ausliest und wiederum in einem .txt-Logfile abspeichert. Außerdem wird eine weitere Schaltfläche benötigt, die es ermöglicht, dieses Logfile erneut einzulesen und somit das ehemals erstellte Fahrprogramm zu laden.

4.2 Funktion des Messplatzes

In diesem Abschnitt soll nun die Funktion des Messplatz zusammenhängend und experimentbezogen beschrieben werden.

Um den Messplatz in Betrieb zu nehmen, ist es erfoderlich die ADwin zu booten. Nach Installieren und Befüllen einer CD, sowie Schließen der Sicherheitstüren, muss der „Init“-Button der Player-Steuerung gedrückt werden. Dann empfiehlt es sich, die CD langsam (z.B. 2...3 Hz) rotieren zu lassen, um sich auf der CD zurecht finden zu können. Die idealen Einstellungen für die Radial- und Azimutal-Position können so schrittweise ermittel werden.

Nun kann sowohl die CamWare-Software, als auch das Programm der ADwin-Karte noch einmal neu gestartet werden, da die Bildanzahl auf dem Bildverarbeitungs-PC auf ca. 320 Bilder begrenzt ist, was bei einer Aufnahmefrequenz von 8 Hz bereits nach 40 Sekunden erreicht ist.

Jetzt kann das Experiment gestartet werden. Je nach Anwendung gibt es verschiedene Vorgehensweisen. Im Falle der Untersuchung von hydrophoben Barrieren wird z.B. die Frequenz des CD-Players schrittweise erhöht, bis zum Durchbrechen der Barriere. Der zeitliche Verlauf dieser Frequenz wird dem Benutzer direkt auf der Oberfläche visualisiert. Gleichzeitig wird ein Logfile erstellt.

Folgende Abbildung 4.5 zeigt ein Experiment, bei dem das Durchbrechen von hydrohoben Barrieren beobachtet wurde.

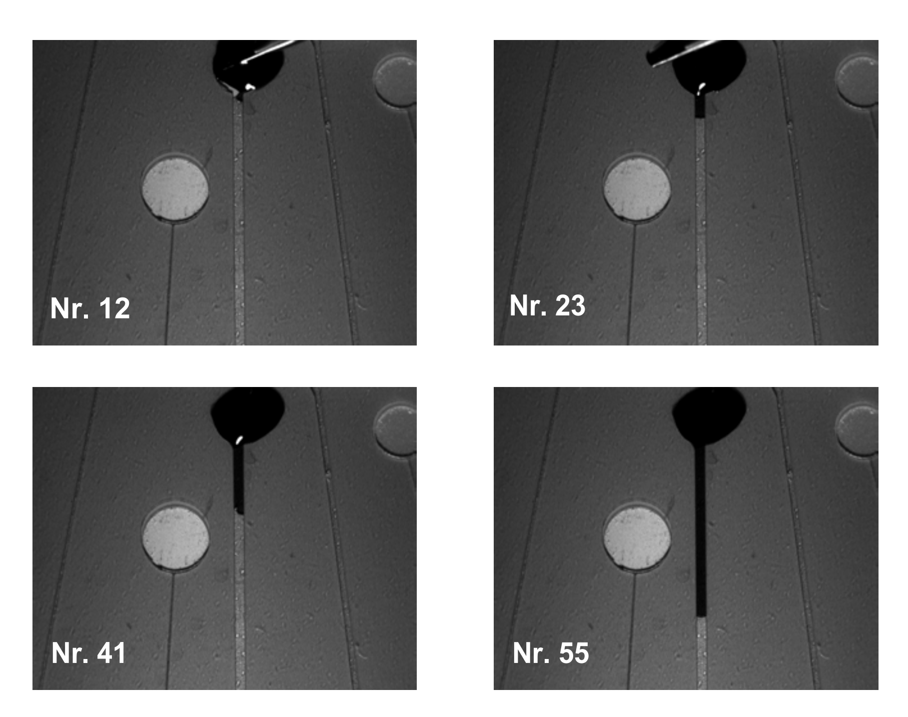


Abbildung 4.5: *Beispiel eines Experimentes bei dem das Durchbrechen von hydrophoben Barrieren auf einer strukturierten CD zu sehen ist. In das Bild ist die jweilige Bild-Nummer eingeblendet.*

Das mitprotokollierte Logfile ist in Abb. 4.6 zu sehen.

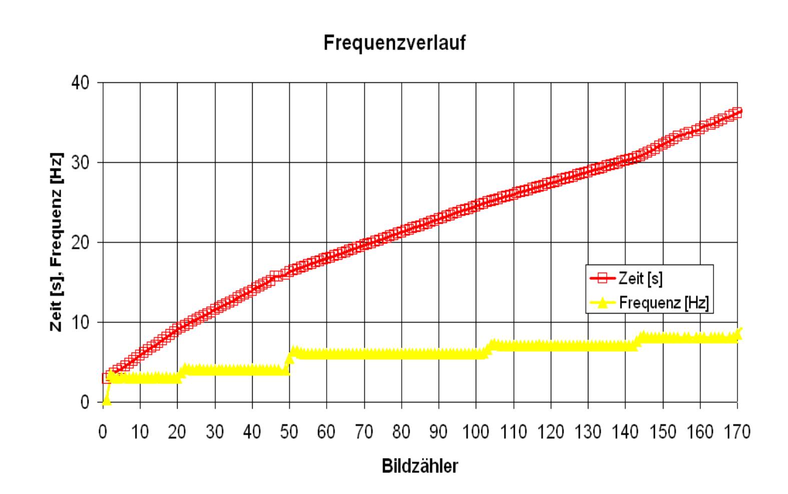


Abbildung 4.6: *Das mitprotokollierte Logfile zeigt pro Bild die aktuelle Drehfrequenz und die Zeit seit dem Beginn des Experiments. In BIld Nr. 55 ist der Durchbruch der Barriere erkennbar, bei diesem Bild zeigt diie Frequenzverlaufs-Grafik die Frequenz 6,02 Hz an.*

4.3 Bildinstabilitäten

Kapitel 4.2 hat die Funktionalität des Messplatzes gezeigt. Nach der Durchführung einiger Experimente fiel aber auf, dass die aufgenommenen Bilder gewisse Defizite aufweisen. Zum einen ist die Helligkeit über das Bild nicht gleichmäßig verteilt, andererseits ist die Gesamthelligkeit von Bild zu Bild unterschiedlich.

Außerdem wurde ein azimutales Bildspringen festgestellt, d.h. dass in zwei aufeinanderfolgenden Bildern nicht der exakt gleiche Bildausschnitt zu sehen ist. Um die Messergebnisse, also die aufgenommenen Bilder optimal miteinander vergleichen zu können, ist es von ausserordentlichem Interesse, dass der betrachtetete Bildausschnitt immer den selben Bereich auf der CD zeigt. Wenn man bestimmten Helligkeitswerten beispielsweise über Falschfarbendarstellung betimmte Farben zuordnet, so könnten MIschprofile erkannt und damit Mischvorgänge über Intensitätsverteilungen innerhalb des Bildes nachgewiesen und näher untersucht werden. Ein springedes Bild ist bei solchen Auswertungen störend.

4.3.1 Helligkeitsschwanken

Für die unterschiedlichen Helligkeiten von Bild zu Bild gibt es zwei Ursachen. Wie in Kap. 3.1 ausführlich beschrieben, schwankt zum einen die Amplitude der Lichtintensität des Stroboskops mit bis zu 2,04 % um den Mittelwert. Zum anderen schwankt auch die Blitzverzögerung dt zwischen dem Intensitätsmaximum und dem Steuersignal mit bis zu 2,07 % um deren Mittelwert bei gleichbleibender Temperatur. Beides zusammen führt dazu, daß zwei aufeinanderfolgende Bilder unterschiedliche Helligkeiten aufweisen können.

Die Zunahme der Blitzverzögerung mit ansteigender Temperatur liefert einen weiteren Beitrag für unterschiedliche Helligkeitswerte zeitlich weit auseinanderliegender Bilder, hat aber nichts mit verschiedenen Helligkeiten direkt aufeinanderfolgender Bilder zu tun, da sich die Temperatur und damit auch die Blitzverzögerung nicht abrupt, sondern nur minutenweise ändert.

Das Helligkeitsschwanken ist also durch die Charakteristik des Stroboskops bestimmt, welche sich bei dem verwendeten Gerät nicht einstellen läßt.

4.3.2 Bildspringen

Der mechanische Aufbau aus MayTec-Profilen, auf dem der Linearantrieb zur Kamera-Verfahrung montiert ist, ist so stabil, dass er nur bei gezielten Erschütterungen schwingt. Bei normalen Betriebsbedingungen trägt er also nicht zum Bildspringen bei.

Auswertung mit NeuroCheck

Da die Aussagen, ob ein Bild springt oder nicht, sehr subjektiv sein können, wurde als erstes das aufgetretene Bildspringen genau quantifiziert. Hierfür wurde mit AutoCad die in

Abb. 4.7 gezeigte Struktur erstellt, die ausgedruckt und auf eine CD aufgeklebt wurde. Wie sich später herausstellte, hätte für die Auswertung mit NeuroCheck auch ein einfacher Strich genügt.

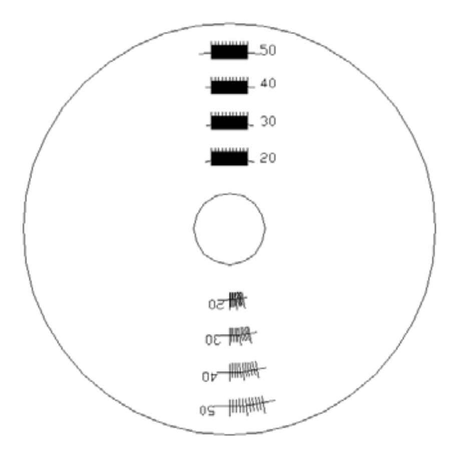


Abbildung 4.7: Entworfene „Mess-CD“ zur Quantifizierung des azimutalen BIldspringens. Die Strukturen wurden mit dem Zeiss Axiophot 1 vermessen: Die Strichstärke beträgt zwischen 50 und 70 µm (Design: 50 µm), der Abstand zweier Striche zwischen 190 und 215 µm (Design: 200 µm).

Mit NeuroCheck, einem Bildverarbeitungstool für Sichtprüfungen, wurde der Schwerpunkt eines solchen Striches ermittelt, d.h. der horizontale und vertikale Abstand des Mittelpunkts einer Struktur zum Bildrand. HIer interessiert nur der horizontale Abstand. Die Tatsache, daß eine solche Teststruktur mit zunehmender Drehfrequenz verwischt, hat keine Auswirkung auf das Messergebnis, da es auf das Springen des Mittelpunkts zwischen zwei gleich verwischten Strukturen von Bild zu Bild ankommt.

Bei den gleichen Frequenzen, mit denen der CD-Player evaluiert wurde, wurden für die Radien 2, 3, 4 und 5 cm jeweils 100 Bilder aufgenommen, die mit NeuroCheck statistisch ausgewertet wurden. Der auf der Kreisbahn eines bestimmten Radius r zurückgelegte Weg s eines Bildpunktes bezüglich des Nulldurchgangstriggers des CD-Players hängt ab von der Zeit t zwischen Nulldurchgangstrigger und Aufnahmezeitpunkt des Bilds:

$$s = v \cdot t = \omega \times r \cdot t = 2 \cdot \Pi \cdot \upsilon \times r \cdot t$$

Deshalb wurden die Messreihen bei den Azimutal-Winkeln 0° und 270° (in der Test-Point.-Steuerung) aufgenommen. Abbildung 4.8 zeigt die Aufnahme der Mess-CD mit der Kamera-Software.

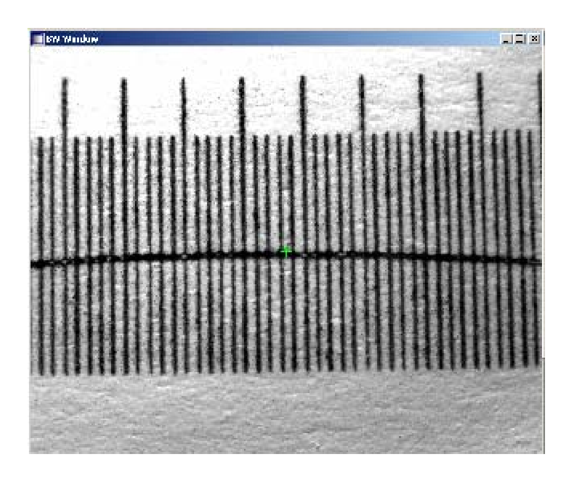


Abbildung 4.8: Der CamWare-Screenshot zeigt die Aufnahme der „Mess-CD“

NeuroCheck gibt eine Liste mit den Abständen der Mittelpunkte des untersuchten Striches zum Bildrand (in Pixel) der 100 Bilder aus Auch hier wurde wiederum mit Corel PhotoPaint einem Pixel ein bestimmter µm-Wert zugeordnet (bei stehender CD). Die Standardabweichung dieser 100 Messwerte stellt somit das Bildspringen in µm dar. In Abb. 4.10 ist das Bildspringen der drei unterschiedlichen ADbasic-Verionen bei einem Azimutal-Winkel der TestPoint-Steuerung von 0° für einen Radius von r = 3 cm dargestellt.

Zudem ist das berechnete Bildspringen, welches allein durch die Schwankung des CD-Players verursacht wird, aufgeführt. Die in Kap. 3.2 ermittelte Standardabweichung der Periodendauer des CD-Players bezieht sich immer auf die gesamte Periodendauer T und ist in Abb. 4.9 nochmals dargestellt.

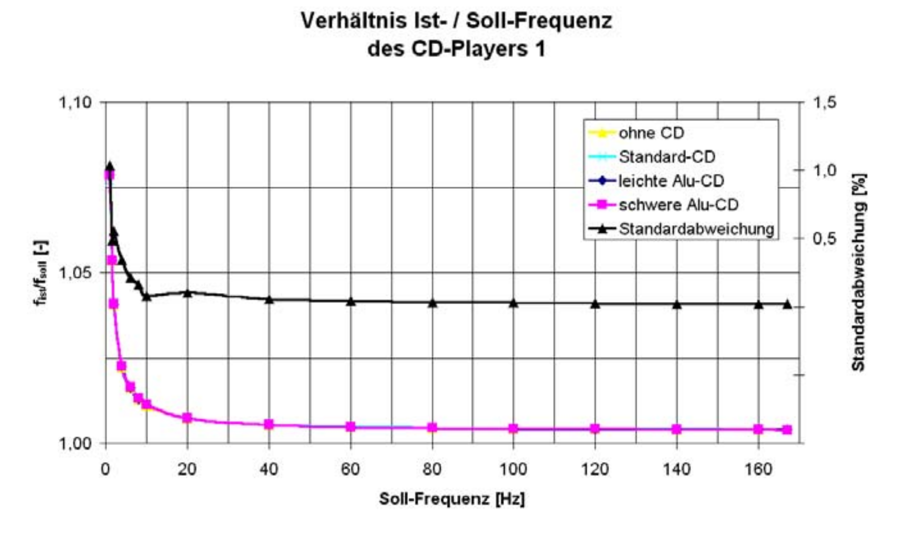


Abbildung 4.9: Standardabweichung der Periodendauer T des CD-Players

Die gesamte Periodendauer T kann also um den Wert der Standardabweichung länger oder kürzer sein. Der Zeitpunkt der Bildaufnahme wird ausgehend vom Nulldurchgangstrig-

ger vorausberechnet und legt dabei die zuletzt ermittelte Periodendauer bei diesem Nulldurchgangstrigger zugrunde. Soll z.B. ein BIld bei dem Winkel 180° nach dem Nulldurchgang aufgenommen werden, so bedeutet dies eine Wartezeit von 1/2 T. Für T wird der beim letzten Nulldurchgangstrigger ermittelte Wert eingesetzt.

Dreht sich die CD nun mit der gleichen Frequenz, mit der gerade die Periodendauer T ermittelt wurde, so landet man tatsächlich bei 180°. Die Periodendauern sind aber nicht konstant, sondern statistisch verteilt und weisen die ermittelte Standardabweichung auf. Dies bedeutet, dass die CD für die nun folgende halbe Umdrehung auch den halben Wert der Standardabweichung von T länger oder kürzer benötigen kann. Da dies nicht erfasst wird, spiegelt sich dies wiederum in einem springenden Bild wieder.

Da die Kamera wegen der Blitzverzögerung des Stroboskops sowieso eine gewisse Zeit nach dem Nulldurchgangstrigger angesteuert werden muss, wurde diese Wartezeit in der ADbasic-Programmierung auf 1/2 T gesetzt. Diese Wartezeit beinhaltet die aktuelle Periodendauer der rotierenden CD und somit wird der Bildaufnahmezeitpunkt abhängig von der aktuellen Drehfrequenz des CD-Players angepaßt. Man sieht also auch bei sich verändernder Drehfrequenz immer den selben Bildausschnitt. Durch die Wahl von 1/2 T erreicht man zusätzlich eine Unabhängigkeit in der Drehrichtung, da diese Zeit sowohl bei Links- als auch bei Rechtsdrehung zum selben Bildausschnit führt (jeweils 180° gegenüber dem Nulldurchgangstrigger).

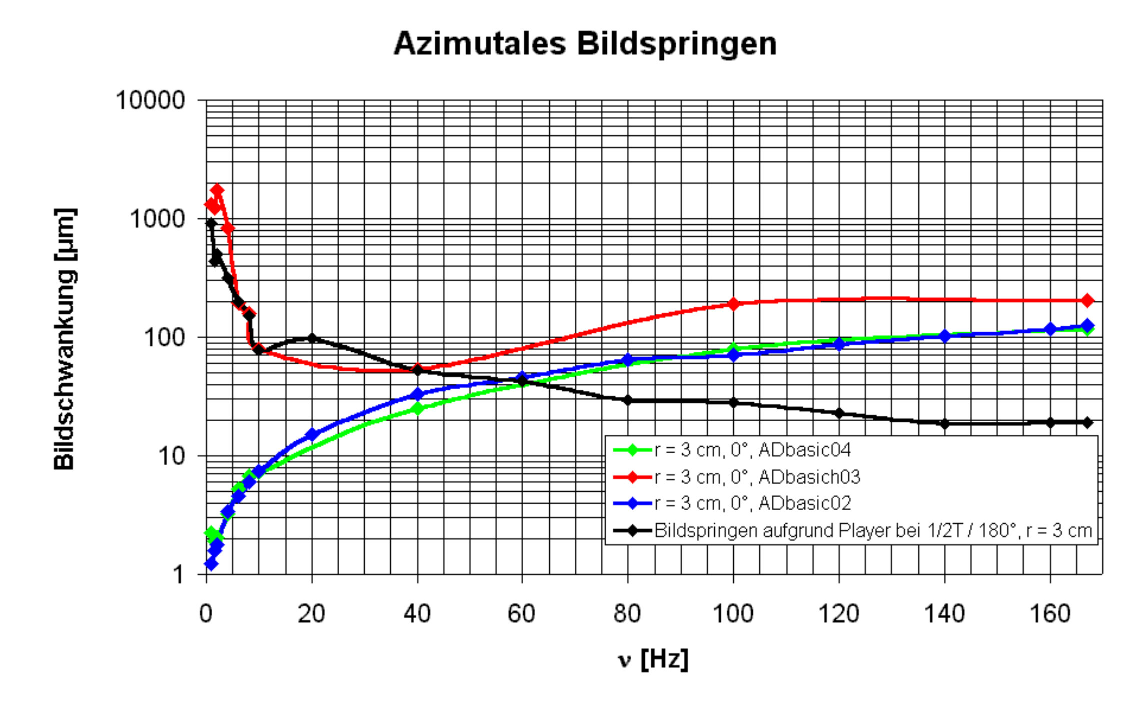


Abbildung 4.10: Azimutales Blidspringen bei r = 3 cm und einem Azimutal-Winkel in der TestPoint-Steuerung von 0° bei verschiedenen ADbasic-Versionen. Zusätzlich ist das berechnete Bildspringen aufgrund der Schwankung der Periodendauer des CD-Players aufgeführt.

Durch die Wartezeit von 1/2 T in ADbasic, entspricht der in TestPoint eingestelllte Azimutal-Winkel von 0° auf der CD einem Winkel von 180°. Der reale Winkel ist also immer 180° größer als der in TestPoint eingestellte. Deshalb muss das reale Bildspringen bei einem Azimutal-Winkel von 0° in der TestPoint-Steuerung mit dem berechneten Bildspringen des CD-Players bei 180°, also 1/2 T, verglichen werden.

Das Bildspringen aufgrund des Players berechnet sich wiederum mit folgender Formel:

$$s = v \cdot t = \omega \times r \cdot t = 2 \cdot \Pi \cdot \upsilon \times r \cdot t$$

Für t wird dabei die Standardabweichung beim entsprechenden Winkel eingesetzt, also 1/2 Standardabweichung bei 1/2 T usw.. Abbildung 4.11 zeigt das Bildspringen für einen Azimutal-Winkel von 270°.

Abbildung 4.11: Azimutales Blidspringen bei r = 3 cm und einem Azimutal-Winkel in der TestPoint-Steuerung von 270° bei verschiedenen ADbasic-Versionen. Zusätzlich ist das berechnete Bildspringen aufgrund der Schwankung der Periodendauer des CD-Players aufgeführt.

Das Bildspringen wurde zuerst bei der ADbasic-Version 02 untersucht. Verwunderlich war hier, dass bei einem Azimutal-Winkel von 0° in der TestPoint-Steuerung ein deutlich geringeres Springen auftritt, als dies bereits allein durch die Schwankung des CD-Players hervorgerufen wird, denn 0° der TestPoint-Steuerung entsprechen 180° auf der CD (vgl. Abb. 4.10).

Wenn es sich um den direkten Nulldurchgang handeln würde, wäre dies verständlich, da dann die ADwin-Karte den Ausgangstrigger unmittelbar nach dem jeweiligen Nulldurch-

gangstrigger ausgeben würde, und das Bildspringen durch die Abtastrate der ADwin von 12,5 µs determiniert wäre. Die Schwankung der Periodendauer spielt dann keine Rolle, da diese sich erst zu einem späteren Zeitpunkt auswirkt.

Daraufhin wurde der ADbaisc-Programmcode noch einmal genauer betrachtet. Dabei fiel eine falsch gesetzte Klammer in der Bedingung für den Ausgangstrigger auf. Im Anhang A.3 sind die verschiedenen Versionen innerhalb des Codes Adbasic02.bas durch das #-Zeichen kenntlich gemacht.

Der Code wurde von „Strobodelay=40000000*((0.5/Frequenz)-Kameradelay)“ auf „Strobodelay=40000000*(0.5/Frequenz)-Kameradelay“ abgeändert und unter der Version Adbasix02.bas gespeichert.

Die Variable Frequenz beiinhaltet die Zeit in SI-Einheiten, also 'Hz, oder 1/s. Deshalb muss die halbe Periodendauer an diesr Stelle in Prozessorschritte umgerechnet werden [40000000*(0.5/Frequenz)]. Ausgehend von dieser Zeit müssen 12,8 µs subtrahiert werden. Dies entspricht 512 Prozessorschritten, dem Wert der Variable „Kameradelay“. Durch die Klammer in der Version 02 wird dieser Wert aber mit dem Faktor 40000000 verrechnet, was zu einer Subtraktion von 512 Sekunden, anstatt 512 Prozessorschritten führt.

Da es so aussieht, als würde die Version Adbasic02 den Nulldurchgangstrigger unmittelbar auf den Ausgangstrigger weiterschalten, wird vermutlich die große negative Wartezeit von -512 Sekunden als Null interpretiert.

Das Vermessen des tatsächlichen Bildspringens bei der Version 03 zeigt den zu erwartenden Verlauf. Das Bild springt hier um den Wert der Periodendauer-Schwankung des CD-Players bei 180°. Die Version 03 funktioniert aber im unteren Frequenzbereich bis 8 Hz nur bis zu einem Azimutal-Winkel von 180°, da 180° der TestPoint-Steuerung bereits 360° auf der CD entsprechen. Bei einer Umdrehung der CD von 360°, also bei wiederholtem Auftreten eines Nulldurchgangstriggers, wird bei der Frequenzteilung von 1 der Strobotimer bereits zu diesem Zeitpunkt neu gesetzt. Dadurch wird auch „NowDelta“ wieder auf Null gesetzt und damit die Bedingung zum Schalten des Ausgangstriggers nicht erreicht. Die Zeiten überlappen sich. Erst ab einer Frequenzteilung von 2, wo der Strobotimer nach dem zweiten darauffolgenden Nulldurchgangstrigger (720° / 2 T gegenüber dem ersten Nulldurchgangstrigger) gesetzt wird, ist ein WinkelDelay größer 180° (bzw. 360°) bis 360^ (bzw. 540°) möglich - es entstehen keine Überschneidungen.

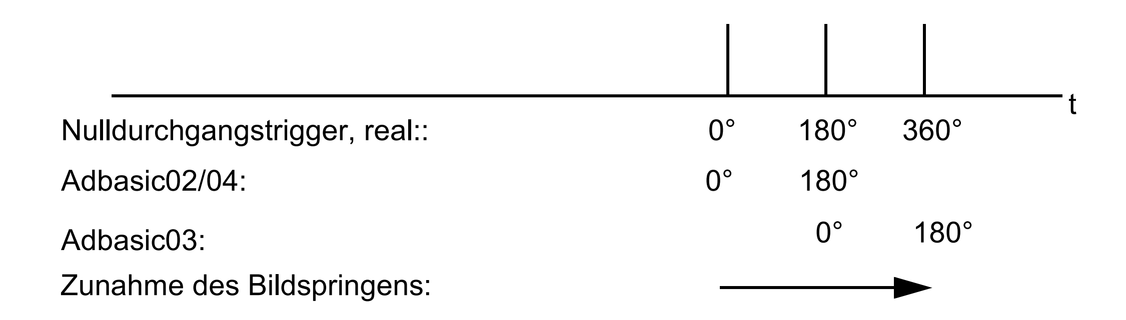
In einem weiteren Schritt wurde die Version 04 entwickelt, die auf den Offset von 180° verzichtet und somit den Ausgang-Trigger 12,8 µs vor dem Nulldurchgangstrigger des CD-Players setzt.

Für einen Winkel von 0° liefern die Versionen 02 und 04 ein besseres Ergebnis, als die Version 03, da hier der Nulldurchgangstrigger direkt durchgeschalten wird. Die Version 03 nimmt das 0°-Bild erst bei realen 180° auf und die Schwankung des CD-Players kommt

somit voll zum Tragen. Bei 270° zeigen alle Versionen ein ähnliches Verhalten, da sich hier die CD bei allen Versionen bezüglich des jeweiligen Nulldurchgangstriggers um 270° unkontrolliert weiter dreht. Nur nur die Version 03 funktiiniert bei einem Azimutal-Winkel von 270° erst ab 8 Hz. Die Ursache hierfür wurde gerade erklärt.

Das Bildspringen ist also in erster Linie durch das äußerst geringe Schwanken der Periodendauer des CD-Players begründet. An dieser Stelle wird also nochmals die Wichtigkeit der Evaluation der Frequenzstabilität des CD-Players ersichtlich.

Für Winkel größer 180° kann auch nicht ausgehend vom darauffolgenden Nulldurchgangstrigger (360°) der entsprechende Wert subtrahiert werden, da zu dem Zeitpunkt wo der Ausgangstrigger gesetzt werden müsste, dieser Nulldurchgangstrigger noch nicht eingetreten und somit unbekannt ist. Der Ausgangstrigger kann also nur nach einem Nulldurchgangstrigger gesetzt werden, und nicht davor. Somit tritt bei Winkeln ungleich 0^ 0° immer ein Bildspringen auf.



Die Grafik 4.12 macht deutlich, daß auch die ADwin einen Beitrag zum Bildspringen liefert

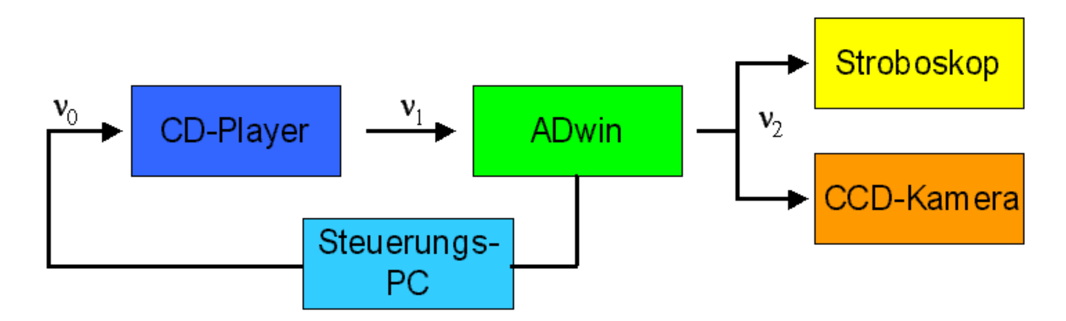


Abbildung 4.12: Flussdiagramm der Steuersignalabfolge ausgehend vom Steuerungs-PC. Die CCD-Kamera wird in der Regel mit einer Verzögerung von 12,8 µs gegenüber dem Stroboskop ausgelöst.

Die ADwin tastet das Player-Signal alle 12,5 µs ab.und leistet somit unabhängig von der Frequenz des Players ebenfalls einen Beitrag zum Bildspringen Dies spielt also nur bei hohen Drehzahlen mit großen Bahngeschwindigkeiten eine Rolle.wie in Abb. 4.10 und Abb. 4.11 zu sehen ist.

A Anhang

A.1 Technische Spezifikationen LeCroy LT224

Acquisition System:

- Bandwidth (-3dB): 200 MHz @ 50 Ohm
- INPUT IMPEDANCE: 50 Ohm ±1.0%; 1 MOhm // 12 pF typical (using PP006 probe)
- Input Coupling: 1 MOhm: AC, DC, GND; 50 Ohm: DC, GND
- Max Input: 50 Ohm: 5 Vrms; 1 MOhm: 400 Vmax (peak AC <-5kHz + DC)
- Single Shot Sampling Rate per Channel: 200 MS/s max
- Repetitive (RIS) Sampling Rate: 10 GS/s max
- Acquisition Memory: 100 kpts/Ch
- Vertical Resolution: 8 bits
- Sensitivity: 2 mV – 10 V/div fully variable
- DC Gain Accuracy: ±(1.5% +0.5% of full scale)
- Offset Range: 2 mV–50 mV/div: ±1 V100 mV–500 mV/div: ±10 V1 V–10 V/div: ±100 V
- Offset Accuracy: ±(1.5% + 0.5% of full scale + 1.0 mV)

Timebase System

- Clock Accuracy: <=10 ppm
- Interpolator Resolution: 5 ps
- External Clock: <=200 MHz, 50 Ohm, or 1 MOhm impedance

Triggering System

- Pre-Trigger Recording: 0–100% of horizontal time scale
- Post Trigger Delay: 0–10,000 divisions
- Holdoff by Time or Events: Up to 20 s or from 1 to 99,999,999 events
- Internal Trigger Range: ±5 div
- Maximum Trigger Frequency: Up to 500 MHz with HF coupling

A.2 Abhängigkeiten der SensiCam-Bild-Wiederholrate

Imaging Frequency and CCD Readout Time at different CCD resolutions
SensiCam LongExposure SuperVGA, b/w,
Exposure time 1.29ms, Frame Auto Sequential modus

		Vertical Binning											
Pixel		**1x**		**2x**		**4x**		**8x**		**16x**		**32x**	
H x V		**Hz**	***ms***	**Hz**	***ms***	**Hz**	***ms***	**Hz**	***ms***	**Hz**	***ms***	**Hz**	***ms***
1280 x 1024	- - -	8.13	*121.74*	15.88	*61.69*	15.88	*61.69*	30.34	*31.67*	55.73	*16.65*	70.47	*12.90*
1280 x 512	ULC[1)]	14.70	*66.73*	26.32	*36.71*	26.32	*36.71*	43.50	*21.70*	64.60	*14.19*	73.51	*12.31*
	LRC[2)]	14.00	*70.13*	24.15	*40.11*	24.15	*40.11*	37.90	*25.10*	52.96	*17.59*	58.80	*15.72*
1280 x 256	ULC[1)]	24.79	*39.05*	39.48	*24.04*	39.48	*24.04*	56.10	*16.54*	71.06	*12.78*	76.13	*11.85*
	LRC[2)]	22.38	*43.39*	33.70	*28.38*	33.70	*28.38*	45.11	*20.88*	54.31	*17.12*	57.23	*16.18*
1280 x 128	ULC[1)]	38.07	*24.98*	53.29	*17.47*	53.29	*17.47*	66.61	*13.72*	76.13	*11.85*	78.95	*11.38*
	LRC[2)]	31.82	*30.14*	41.80	*22.64*	41.80	*22.64*	49.57	*18.88*	54.66	*17.01*	56.10	*16.54*
1280 x 64	ULC[1)]	50.75	*18.41*	62.70	*14.66*	62.70	*14.66*	71.06	*12.78*	76.13	*11.85*	77.51	*11.61*
	LRC[2)]	40.60	*23.34*	47.90	*19.59*	47.90	*19.59*	52.63	*17.71*	55.37	*16.77*	56.10	*16.54*
1280 x 32	ULC[1)]	62.70	*14.66*	71.06	*12.78*	71.06	*12.78*	76.13	*11.85*	78.95	*11.38*	79.69	*11.26*
	LRC[2)]	47.37	*19.82*	51.99	*17.94*	51.99	*17.94*	54.66	*17.01*	56.10	*16.54*	56.47	*16.42*
32 x 32	ULC[1)]	62.70	*14.66*	71.06	*12.78*	71.06	*12.78*	76.13	*11.85*	78.95	*11.38*	79.69	*11.26*
	LRC[2)]	47.37	*19.82*	51.99	*17.94*	51.99	*17.94*	54.66	*17.01*	56.10	*16.54*	56.47	*16.42*
32 x 1024	ULC[1)]	8.13	*121.74*	15.88	*61.69*	15.88	*61.69*	30.34	*31.67*	55.73	*16.65*	70.47	*12.90*
	LRC[2)]	8.13	*121.74*	15.88	*61.69*	15.88	*61.69*	30.34	*31.67*	55.73	*16.65*	70.47	*12.90*
640 x 512	center	14.16	*69.31*	39.29	*24.64*	39.29	*24.64*	39.11	*24.28*	55.37	*16.77*	61.79	*14.89*

[1)] Region of Interest defined at the Upper Left Corner
[2)] Region of Interest defined at the Lower Right Corner
ms : readout time of the CCD in miliseconds
Hz : Imaging frequency

TS0

[Quelle: Fa. PCO}

A.3 ADbasic-Programmcode

```
--------------------------------------------------------------------------------

'Variablen-Deklarationen
'-------------------------------------------------------------------------------

DIM Eingang AS INTEGER          'Hier wird der Wert des Eingangssignals abgelegt
DIM RTOld, RTNew AS INTEGER     'Zwischengespeicherte Zeiten zur
                                'Frequenzermittlung. Zeiten sollten INTEGER sein!
DIM Flagobunt AS INTEGER        'Detektor ob Flanke des Eingangssignals oben oder
                                'unten
DIM DataSetWritten AS INTEGER   'Detektor ob DatenSatz bereits an Testpoint raus
                                'ist
DIM IndexCounter AS INTEGER     'Zählt die generierten Ausgangspulse - bei jedem
                                'wird ein Bild gemacht.
DIM FlagLastSignum AS INTEGER   'Letzes Vorzeichen des Timers (0=-, 1=+)
DIM ZaehlerMultiply AS INTEGER  'Anzahl der Timer-Zaehler-Überläufe
DIM FrequenzAS FLOAT            'Ermittelte Frequenz des Eingangssignals
DIM Frequenzteiler AS INTEGER   'teilt die Frequenz des Eingangssignals in ein
                                'Ausgangssignal <= 8Hz
DIM AusgangOben AS INTEGER      'Signalhöhe oben am Ausgangsignal
DIM AusgangUnten AS INTEGER     'Signalhöhe unten am Ausgangsignal
DIM Teilerzaehler AS INTEGER    'zählt, wieviele positive Flanken durchlaufen
                                'wurden
DIM NowTimer AS INTEGER         'Speichert die Zeit von READ_TIMER(), unmittelbar
```

```
                                'beim Aufnehmen des Messwertes (Eingangssignal)
DIM NowDelta AS INTEGER         'speichert die Differenz zwischen NowTimer und
                                'Strobotimer
DIM Strobotimer AS INTEGER      'Vergleichtimer für das Stroboflag
DIM Strobodelay AS INTEGER      'Delay zwischen Trigger-out des Players und
                                'Steuertrigger des Stroboskops
DIM Kameradelay AS INTEGER      'Delay zwischen Steuertrigger Stroboskop und
                                'Kamera-Belichtung.

DIM Strobotrigger AS INTEGER    'Länge des Stroboskop-Triggersignals
DIM Winkeldelay AS INTEGER      'Zusätzliches Zeit-Delay um bei einem bestimmten
                                'Beobachtungswinkel zu landen


'--------------------------------------------------------------------------------
'
Initialisierungen
'--------------------------------------------------------------------------------

INIT:                           'Alle Zeilen zwischen hier und EVENT werden genau
                                'einmal beim Start ausgeführt
GLOBALDELAY=500                 'Der Prozessor zählt die Zeiten in Taktzyklen,
                                '1 Schritt = 25 ns. GLOBALDELAY definiert die Zeit,
                                'nach der das gesamte Programm erneut gestartet
                                'wird. Wenn das System nicht hinterherkommt (also
                                'die Laufzeit des Programms größer ist, als
                                'GLOBALDELAY), erscheint Fehlermeldung: Karte
                                'meldet sich nicht
                                'Deshalb unkritisch. 500 entspricht somit einer
                                'Abtastung alle 12,5 µs.
PAR_6=0
FlagObUnt=0
RTOld=0
RTNew=0
AusgangOben=49152     '0 V = 32768, 2,5 V = 40960, 5 V = 49152, 10 V = 65536, -10 V = 0
AusgangUnten=32768
Teilerzaehler=0
Frequenzteiler=1
Strobotrigger=20000        'Laenge 0,5 ms (Drello-Empfehlung: 0,03..1 ms), dies ist
                           'so kurz, daß die Parameteranzeige
                           'nicht mehr mitkommt, und man deshalb das Schwanken des
                           'Signals nur noch am Oszi, nicht aber in der
                           'Parameteranzeige mitverfolgen kann.
IndexCounter=0
DataSetWritten=1           'erstmal Übergabe an Testpoint deaktivieren, damit erst
                           'bei der ersten Flanke etwas übertragen wird

FlagLastSignum=1           'beim Start wird erstmal positiv gezählt
ZaehlerMultiply=0          'wird unten beim ersten überlaufen hochgesetzt

Kameradelay=512            '=12,8 µs, so wie in CamWare eingestellt

'Parameter die von Testpoint aus übergeben werden sollen, müssen direkt in der
'jeweiigen Programmzeile stehen.
'Es läßt sich nicht am Anfang einer Variablen ein Parameter zuweisen. Die Variable
'wird dann nur einmal beim Start auf diesen Parameter gesetzt, im Betrieb dann nicht
'mehr.
```

```
'-------------------------------------------------------------------------------
'Hauptprogramm
'-------------------------------------------------------------------------------

EVENT:
  NowTimer=READ_TIMER()   'Speichert aktuelle Zeit, wird bei jedem Durchgang neu
                          'ausgelesen, nicht aber innerhalb des Programms. Ist
                          'aber auch nicht nötig, da das gesamte Programm eh
                          'schnell durchlaufen muss. Bei Globaldelay=500 eben
                          'innerhalb von 12,5 µs.
  Eingang=ADC(1,1)        'mißt den analogen Eingang 1 mit der Verstärkung 1
  NowDelta=NowTimer-Strobotimer      'Zwischenspeichern des Deltas

'-------------------------------------------------------------------------------

'continuous flash mode
'-------------------------------------------------------------------------------
IF (PAR_6=1) THEN              'Der continuous-flash mode in Testpoint setzt den
                               'Parameter 6 auf 1, dann wird
     IF (NowDelta<5000000) THEN'diese Schleife durchlaufen, ansonsten wird das
                               'Standard-Programm durchlaufen.
          DAC(1,AusgangOben)   '5000000 * 25 ns = 125 ms (halbe Periodendauer von
                               '4 Hz)
     ENDIF
     IF ((NowDelta>5000000) and (NowDelta<10000000)) THEN
          DAC(1,AusgangUnten)  'zwischen 125 und 250 ms den Ausgang nach unten
                               'schalten.
     ENDIF
     IF (NowDelta>10000000) THEN
          Strobotimer=NowTimer 'bei 250 ms den Strobotimer wieder auf die aktuelle
                               'Zeit setzen (NowTimer),
     ENDIF                     'damit ist NowDelta im ersten Durchlauf nahezu 0.
ELSE
'-------------------------------------------------------------------------------


'Wenn Delay-Zeit verstrichen (also Delta>=Delay, dann starte Strobo, und zwar
’solange bis Strobo-Delay und Strobotrigger vorüber
IF ((NowDelta>=Strobodelay+Winkeldelay) and
     (Strobodelay+Winkeldelay+Strobotrigger>=NowDelta)) then
     DAC(1,AusgangOben)
     IF (DataSetWritten=0) then      'Wenn Ausgangs-Impuls gesetzt wird, schreibe
                                     'einmal alle Werte nach Testpoint!
          IF ((FlagLastSignum=1) and (NowTimer<0)) then
                                     'Wenn letztes Vorzeichen des Timers positiv
                                     'war und nunder Timer negativ wird,dann ist
               INC(ZaehlerMultiply)  'der Zähler voll,also erhöhe ZehlerMultiply
               FlagLastSignum=0      'und setze Flag auf 0 für negativ.
          ELSE
          IF ((FlagLastSignum=0) and (NowTimer>0)) then
                                     'Läuft nun der Zähler wieder über 0, so setze
               FlagLastSignum=1      'Flag auf 1
          ENDIF
          ENDIF
     INC(IndexCounter)               'setzt den Impuls (Bild)-Zähler hoch

'Werte in Parameter schreiben für Testpoint
          Par_1=IndexCounter         'Bild-Zähler
          Par_2=NowTimer/40000       'Zeit in ms
          Par_3=ZaehlerMultiply      'Anzahl Zähler-Überläufe
```

```
          Par_4=Frequenz*1000       'Frequenz in mHz schreiben für Testpoint
          DataSetWritten=1          'Hierduch wird die Übergabe an Testpoint
                                    'disabled, damit nicht mehrmals die selben
                                    'Werte übergeben werden.
     ENDIF
ENDIF

'...anschließend setze das Ausgangssignal auf 0V.
IF (NowDelta>=Strobodelay+Winkeldelay+Strobotrigger) then
          DAC(1,AusgangUnten)
ENDIF

'--------------------------------------------------------------------------------

'Frequenz-Ermittlung und Startpunkt des Stroboskops
'--------------------------------------------------------------------------------

IF ((Eingang>40000) and (FlagObUnt=0)) then
    DataSetWritten=0           'Wenn der Impuls das erste mal kommt, soll Übergabe
                               'an Testpoint erfolgen
    INC(Teilerzaehler)         'Bei jedem Puls am Eingang wird Teilerzaehler um 1
                               'erhöht
    IF (Teilerzaehler>=Frequenzteiler) then'...wenn dieser größer als
                                          'Frequenzteiler, dann starte
                                          'Strobotimer.
      Strobotimer=NowTimer 'Dies bewirkt, daß das Strobo-Trigger-Signal
                          'zeitsynchron (evtl. auch mit Delay, aber auf jeden Fall
                          'zeitsynchron) mit der ansteigenden Flanke des
                          'Eingangssignals gesetzt wird. Strobotimer MUSS also
                          'HIER gesetzt werden!
                          'Er wird also gesetzt nachdem der Player-Impuls
                          '"Frequenzteiler-mal" erfasst wurde.

'Auf diese Weise verliert man den erstmöglichen Puls, da der Strobotimer nur dann
’gestartet wird, wenn der Teilerzaehler einmal größer als der Frequenzteiler war.
'Aber dies spielt keine Rolle.
     Teilerzaehler=0      'Teilerzaehler wieder auf 0 setzen, um erneut hochzählen
                          'zu können.
    ENDIF

        FlagObUnt=1        'soll anzeigen, daß das Eingangssignal oben ist
          RTNew=NowTimer  'Neue Zeit (aktuelle Zeit) auslesen.
          Frequenz=40000000/(RTNew-RTOld) 'Frequenz=1/(Neue Zeit minus alte Zeit)
                                          'Alte Zeit = Zeitpunkt der ansteigenden
                                          'Flanke des letzten Pulse
          RTOld=RTNew                     'Neue Zeit als alte Zeit für den nächsten
                                          'Schritt speichern


'--------------------------------------------------------------------------------

'Kompensation des Bilddrifts
'--------------------------------------------------------------------------------

'Der Ausgangs-Impuls kann nicht unmittelbar nach Erfassen eines Player-Impulses
'gesetzt werden, da der Blitz nach diesem Puls noch eine gewisse Delay-Zeit hat.
'Deshalb wird ein frequenzabhänigiges Zusatz-Delay eingeführt, welches bei größer
'werdenden Frequenzen kleiner wird.

'Bahngeschwindigkeit bei Radius r: v=w*r. v=s/t, w=2*Pi*f, Winkelgeschwindigkeit
'w=v/r=const bei gleichbleibender Frequenz.
```

```
'Periodendauer T=1/f => 0,5/f entspricht einem Delay von einer halben
'Periodendauer (also 180°),abhängig von der aktuellen Frequenz.
'Hierduch verschiebt sich quasi das das Nulldurchgangssignal um 180°, und ist somit
'drehrichtungs-unabhänging.


'########################################################################
'########################################################################
'

'Die verschiedenen erstellten ADbasic-Verionen unterscheiden sich nur in der
'folgenden Zeile. Bei ADbasic01,bas handelt es sich um eine Vorversion.
'

'ADbasic02,bas:
     Strobodelay=40000000*((0.5/Frequenz)-Kameradelay)


'ADbasic03,bas:
     Strobodelay=40000000*(0.5/Frequenz)-Kameradelay


'ADbasic04,bas:
     Strobodelay=-Kameradelay


'Bei Adbasic03.bas handelt es sich um die eigentlich richtige Version, Leider hatte
'sich aber eine zusätzliche Klammer eingeschlichen, wodurch der Messplatz
'überwiegend mit der ertaunlicherweise recht gut funktionierenden Version
'Adbasiic02 lief. Die Variable Frequenz beiinhaltet die Zeit in SI-Einheiten, also
'Hz, oder 1/s. Deshalb muss die halbe Periodendauer an diesr Stelle in
'Prozessorschritte umgerechnet werden: 40000000*(0.5/Frequenz). Ausgehend von
'dieser Zeit müssen 12,8 µs subtrahiert werden. Dies entspricht 512
'Prozessorschritten, dem Wert der Variable Kameradelay. Durch die Klammer in der
'Version 02 wird dieser Wert aber mit dem Faktor 40000000 verrechnet, was zu einer
'Subtraktion von 512 Sekunden, anstatt 512 Prozessorschritten führt.


'Version 03 funktioniert im unteren Frequenzbereich bis 8 Hz nur bis zu einem
'Azimutal-Winkel von 180°, da 180° der TestPoint-Steuerung bereits 360° auf der CD
'entsprechen. Bei einer Umdrehung der CD von 360°, also bei wiederholtem Auftreten
'eines Nulldurchgangstriggers, wird bei der Frequenzteilung von 1 der Strobotimer
'bereits zu diesem Zeitpunkt neu gesetzt Dadurch wird auch NowDelta wieder auf Null
'gesetzt und damit die Bedingung zum Schalten des Ausgangstriggers nicht erreicht.
'Die Zeiten überlappen sich. Erst ab einer Frequenzteilung von 2, wo der Strobotimer
'nach dem zweiten darauffolgenden Nulldurchgangstrigger (720° / 2 T gegenüber dem
'ersten Nulldurchgangstrigger) gesetzt wird, ist ein WinkelDelay > 180° (bzw. 360°)
'bis 360^(bzw. 540°) möglich - es entstehen keine Überschneidungen.

'Die Version 04 verzichtet auf den Offset von 180° und setzt den Ausgang-Trigger
'12,8 µs vor dem Nulldurchgangstrigger des CD-Players.


'########################################################################
'########################################################################

'--------------------------------------------------------------------------------

     Winkeldelay=40000000*(PAR_5/(360*Frequenz))'Berechnung des Winkeldelays in
                                                'Prozessorschritten
```

```
      'Berechnung des Frequenzteilers, unmittelbar nach der Frequenzberechung:
      Frequenzteiler=(Frequenz/8)+1   'Entspricht der MOD-Funktion. Da
                                      'Frequenzteiler als INTEGER definiert ist,
                                      'wird nur der ganzzahlige Wert genommen.
                            'Bsp.: (9/8)+1=2, 9/8 wird auf 1 gerundet, +1=2!
      ACTIVATE_PC           'Parameter für Testpoint zur Verfügung stellen -
                            'allgemeine Freigabe.
   ENDIF

   IF (Eingang<40000) THEN  'setzt das Flag bei abfallender Eingangsflanke wieder
                            'auf 0.
        FlagObUnt=0
   ENDIF
ENDIF
```

Literaturverzeichnis

[1] Volker Materna:
Numerical Simulation of Flow Control and Mixing in a Centrifugally Driven Microfluidic System, Diplomarbeit, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Dezember 2002

[2] Thomas Glatzel:
Hydrodynamics in Rotating Systems, Diplomarbeit, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Juni 2003

[3] Meike Moschallski:
Hydrophobic Flow Control on a Rotating Microfluidic Disk, Diplomarbeit, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Juli 2003

[4] VISIT GmbH & Co.KG, Würzburg, www.visit-gmbh.de:
Video Stroboskop Mocon-RT II, Oktober 2002, S. 3

[5] B. Stasicki, G.E.A. Meier, J. Renschke:
Flash-free high-speed video stroboscope, Proc. of 22th Int. Congress on High Speed Photography and Photonics, Santa Fee, 27 Oct-1 Nov 1996, SPIE

[6] DRELLO Ing. Paul Drewell GmbH & Co. KG, Mönchengladbach, www.drello.de:
Drelloscopie (Werbeprospekt), Oktober 2002

[7] Hamamatsu Photonics Deutschland GmbH, Herrsching, www.hamamatsu.de:
Si PIN photodiode S7797, S5052, S8255, S5573, April 2001

[8] LeCroy Corporation, www.lecroy.de:
Waverunner Benutzerhandbuch, Februar 1999

[9] PC Paper-Consult Engineering Group oHG, Meschede, www.warensortiment.de:
Speicherndes Temperaturmessgerät TL-309, Mai 2001

[10] Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG, Schönaich, www.faulhaber.de:
Motion Controller mit Sinuskommutierung für EC Motoren, Serie MCBL2805, 2.Auflage, September 2002

[11] U. Tietze, Ch. Schenk:
Halbleiter-Schaltungstechnik, Springer Verlag,10. Auflage, 1993, Kap. 27

[12] PCO Computer Optics GmbH, Kelheim, www.pco.de:
SensiCam, SensiCamQE Bedienungsanleitung, Juli 2002

[13] SM Elektronik GmbH, Villingen-Schwenningen, www.sm-elektronik.de:
Referenzhandbuch Kommandoebene SM5/SM300/SM400, Juni 1998

[14] SM Elektronik GmbH, Villingen-Schwenningen, www.sm-elektronik.de*: Programmierhandbuch SM5/SM300/SM400,* September 1998

[15] SM Elektronik GmbH, Villingen-Schwenningen, www.sm-elektronik.de*: SPS-Handbuch SM5/SM300/SM400,* August 1999

[16] SM Elektronik GmbH, Villingen-Schwenningen, www.sm-elektronik.de*: Technisches Handbuch SM300*, Juli 1999

[17] sm motion control GmbH, Villingen-Schwenningen, www.smmotioncontrol.de: *Technisches Handbuch SM300,* April 2002

[18] Jäger Computergesteuerte Messtechnik GmbH, Lorsch, www.adwin.de: *ADwin-light-16, Handbuch*, Version 2.0, Juli 2002

[19] Jäger Computergesteuerte Messtechnik GmbH, Lorsch, www.adwin.de: *ADbasic, Echtzeit-Entwicklungstool für ADwin-Systeme,* ADBasic Version 3.20, April 2002

[20] Jäger Computergesteuerte Messtechnik GmbH, Lorsch, www.adwin.de: *ADwin, Tutorial und Programmierbeispiele,* Ausgabe 1.31, September 2002

[21] Jäger Computergesteuerte Messtechnik GmbH, Lorsch, www.adwin.de: *ADwin, TestPoint-Treiber,* Juni 2000

[22] Jäger Computergesteuerte Messtechnik GmbH, Lorsch, www.adwin.de: *ADwin Treiber Installation, Handbuch für die Interface-Installation von ADwin-Systemen*, Version 1.4, November 2002

[23] Keithley Instruments GmbH, Germering, www.keithley.de: *TestPoint, Reference Guide,* Februar 2001, [www.keithley.de/servlet/Data?id=10435&jsession=0-3816686290074995036. 22.06.03]

[24] Keithley Instruments GmbH, Germering, www.keithley.de: *TestPoint für Windows, „Schnell erlernt“,* Februar 2001, [www.keithley.de/servlet/Data?id=10434&jsession=0-8747159787977454137, 22.06.03]

[25] M.J. Madou and G.J. Kellogg. *The LabCD(TM): A centrifugal-based microfluidic platform for diagnostics*, SPIE, 3259:80–93, 1998

[26] Jens Ducrée, Roland Zengerle: *Microfluidics, Principles - Prototypes - Products,* Springer Verlag, noch nicht veröffentlicht

Danksagung

Als erstes möchte ich meinen Eltern danken, dass sie mir dieses Studium ermöglichten und trotz schwieriger Zeiten in mancherlei Hinsicht die entsprechende Geduld aufbrachten.

Bei Prof. Dr. Roland Zengerle und Dr. Jens Ducrée möchte ich mich für das sehr interessante und interdisziplinäre Thema bedanken, bei dem der System-Gedanke im Vordergrund stand, da es bei der Entwicklung des Messplatzes darum ging, aus mehreren Komponenten ein funktionierendes Gesamtsystem aufzubauen. Ich konnte in dieser Zeit sehr viel praktische Erfahrung sammeln.

Ganz besonder Dank gilt Gerhard Birkle für seine ständige Hilfsbereitschaft bei den unterschiedlichsten Dingen und sein motivierendes „Du hast's gut!“. Ebenfalls ein ganz besonderer Dank an Wolfgang Streule („Kommmm mit!“, „Mein Freund Atze“) für seinen EDV-Support bei diversen PC-Problemen (wenn sich z.B. der Graphikkarten-Treiber wie von selbst löscht) und der auch sonst immer ein offenes Ohr für mich hatte. Bleibt so wie ihr seid!

Für die intensive Betreuung meiner Arbeit danke ich Markus Grumann, sowie Thilo Brenner für die Betreuung zu Beginn der Arbeit.

Auch bei Gino Raffa und Gerhard Kattinger vom HSG-IMIT möchte ich mich für den Support rund um den Player bedanken.

Ein weiterer Dank auch an die Mitarbeiter der mechanischen Werkstatt und der Elektrowerkstatt des IMTEK, die allzeit für verschiedene Aufgaben bereit waren.

Auch bei meinen Kollegen Michael Dobmeier und Patric Schippers, die ich nun schon seit einiger Zeit kenne und die mir in unserem Großraum-Labor-Büro Gesellschaft leisteten, möchte ich meinen Dank aussprechen. Patric, der mit ähnlichen alltäglichen Problemen wie ich zu kämpfen hatte (z.B. rund um TestPoint, Suchen des Dongles), hat es immer wieder geschafft mich zu motivieren. MIt MIchael („ihr habt's ja alle besser als ich“) durfte ich einige interessante Diskussionen über verschiedene Dinge führen. Ich hoffe, dass wir uns auch in Zukunft nicht aus den Augen verlieren.
Mit Tanz und Akrobatik sorgte Meike Moschallski ab und zu für Abwechslung in unserem Büro. Dafür und für die gute Zusammenarbeit am Player-Messplatz ein herzliches Dankeschön.

Dank auch an Philipp Waibel („mit 3 P und einem L“ - nun kann ich's mir merken) für die Unterstützung gegen Ende meiner Arbeit.

Ein weiteres Dankeschön an die gute Seele des Lehrstuhls, Melanie Baumann, die ständig um das Wohlbefinden aller MItarbeiter besorgt war.